



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**NÁVRH MALÉ MULTIFUNKČNÍ MODELÁŘSKÉ CNC
FRÉZKY**

DESIGN OF SMALL MULTIFUNCTIONAL HOBBY CNC MILLING MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Strnad

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Jiří Strnad**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **Ing. Jan Pavlík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh malé multifunkční modelářské CNC frézky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení malé multifunkční modelářské CNC frézky. Frézka má sloužit pro obrábění dřeva, plastu popřípadě lehkých slitin (Al, Zn, atd.), bude rovněž umožňovat 3D tisk metodou FDM. Rozměrové a výkonnostní charakteristiky budou součástí řešerše a návrhu stroje.

Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.
Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.
Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.
Nezbytné výpočty potřebné pro návrh a dimenzování.
Výkresová dokumentace vybraných uzlů.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem malé multifunkční modelářské CNC frézky umožňující frézování slitin hliníku i 3D tisk metodou FDM. Na základě rešerše, analýz a definovaných vstupních požadavků je vytvořen konstrukční návrh, který je ověřen výpočty. Práce obsahuje popis všech částí konstrukce včetně tiskové hlavy, zásobníku nástrojů a bezpečnostního krytování. Následuje popis seřízení geometrie stroje a volba řídicího systému. Součástí práce je 3D model a výkresová dokumentace vybraných konstrukčních uzlů.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the construction proposal of a small multifunctional modeller CNC milling machine that enables milling of aluminium alloys and 3D printing using the FDM method. Based on the research, analyzes and defined entry requirements the construction proposal is created and verified by calculations. The thesis contains a description of all the construction parts including the printhead, the tool tray and the safety cover. The other part of the thesis describes the machine geometry adjustment and specifies the choice of control system. The thesis includes a 3D model and the drawing documentation of selected structural nodes.

KLÍČOVÁ SLOVA

CNC modelářská frézka, frézování, vrtání, 3D tisk, metoda FDM, multifunkční obráběcí stroj, portálová frézka, konstrukce obráběcího stroje.

KEYWORDS

CNC modeller milling machine, milling, drilling, 3D printing, FDM method, multifunctional machine-tool, portal milling machine, machine-tool construction.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRNAD, Jiří. *Návrh malé multifunkční modelářské CNC frézky* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132102>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Pavlík.

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za cenné rady, inspiraci, ochotu a odbornou pomoc při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, přátelům a kolegům za trpělivost a podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Pavlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21.5.2021

.....

Strnad Jiří

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	ANALÝZA ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	19
3.1	Pojem multifunkční CNC modelářská frézka	19
3.2	3D Tisk – princip metody FDM	19
3.3	Stroj ZMorph VX	20
3.4	Stroj Diabase CNC LITE H5-400A	22
3.5	Stroj 5AXISMAKER	24
3.6	Shrnutí	25
4	VOLBA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ	27
5	VOLBA KINEMATICKÉHO USPOŘÁDÁNÍ STROJE	28
5.1	Kritéria multikriteriální analýzy	29
5.2	Vyhodnocení kritérií multikriteriální analýzy	29
6	KONSTRUKČNÍ NÁVRH STROJE	31
6.1	Návrh vřetena	31
6.1.1	Specifikování referenčních materiálů a nástrojů	31
6.1.2	Výpočet řezných sil při frézování	31
6.1.3	Výpočet řezných sil při vrtání	33
6.1.4	Volba vřetena	34
6.2	Volba komponent lineárních posuvových soustav	38
6.2.1	Způsob náhonu	38
6.2.2	Volba typu rotačního pohonu	38
6.2.3	Volba pohybového mechanismu	40
6.2.4	Vedení obráběcích strojů	45
6.3	Návrh posuvové soustavy v ose X	47
6.3.1	Návrh posuvového mechanismu	47
6.3.2	Pohybový šroub	47
6.3.3	Dimenzování pohonu	50
6.3.4	Dimenzování lineárního vedení	52
6.4	Návrh posuvové soustavy v ose Y	56
6.4.1	Dimenzování lineárního vedení	56
6.5	Návrh posuvové soustavy v ose Z	58
6.5.1	Dimenzování pohonu	58
6.5.2	Dimenzování lineárního vedení	60
6.6	Shrnutí výsledků a finální volba lineárního vedení a pohonů pro osy X, Y, Z ..	63
6.6.1	Kontrola vhodnosti výběru komponent lineárního vedení	63
6.6.2	Volba pohonů pro osy X, Y, Z	64
6.7	Návrh konstrukčních variant řešení rámu stroje	67
6.7.1	První varianta v podobě montované konstrukce rámu stroje	67
6.7.2	Druhá varianta v podobě svařované konstrukce rámu stroje	68
6.7.3	Třetí varianta v podobě kombinace litinového stolu a svařovaných stojanů ..	69
6.7.4	Kritéria multikriteriální analýzy	69
6.7.5	Vyhodnocení kritérií multikriteriální analýzy	70
6.8	Konstrukční návrh zvolené varianty s doporučením pro realizaci	71
6.8.1	Detailní konstrukční návrh a popis periferií	71

6.8.2	Spodní rám stroje.....	72
6.8.3	Pravý a levý stojan (lože osy X).....	73
6.8.4	Příčník (osa Y).....	76
6.8.5	Saně a smýkadlo (osa Z)	79
6.8.6	Pracovní stůl	80
6.8.7	Tisková hlava.....	81
6.8.8	Zásobník nástrojů.....	84
6.8.9	Krytování stroje (bezpečnost, přívod energií, třískové hospodářství aj.)	85
6.9	Možnosti seřízení geometrie stroje a zvýšení přesnosti	88
6.10	Volba řídicího systému	90
6.11	Doporučené příslušenství stroje.....	91
7	SHRNUTÍ PARAMETRŮ NOVÉHO STROJE	93
7.1	Zhodnocení, diskuze a doporučení pro praxi	94
8	ZÁVĚR	95
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	97
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	103
10.1	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	103
10.2	Seznam obrázků.....	107
10.3	Seznam tabulek.....	110
11	SEZNAM PŘÍLOH	111

1 ÚVOD

Dnešní doba otevírá firmám, modelářům, kutilům a v neposlední řadě i do techniky nadšeným dětem nové možnosti. Příchod 3D tisku a jeho relativně rychlé rozšíření velmi posunulo úroveň modelářství a dalším stupněm lze uvažovat CNC obrábění.

Problematika 3D tisku a CNC obrábění má několik společných témat, avšak při bližším pohledu na obě technologie je jasné, že každá z nich má zásadně odlišné požadavky na samotnou konstrukci stroje.

Náplní této diplomové práce je návrh malé multifunkční modelářské CNC frézky, která bude sloužit pro obrábění dřeva, plastu a lehkých slitin (Al, Zn apod.), a zároveň bude umožňovat 3D tisk metodou FDM.

Návrh nového stroje je velice komplexní záležitostí, kde konstruktér nesmí nic podcenit nebo zanedbat. K tomu slouží i v této práci důkladná řešerše dané problematiky, která přináší více možných variant konstrukčních řešení, ze kterých je nutné dle stanovených kritérií vybrat tu nevhodnější. Následuje návrh jednotlivých konstrukčních uzlů, který je úzce spojen a podložen výpočtovou zprávou. Tento proces může i ve zkušeném konstruktérském týmu probíhat v několika iteracích, při kterých se mění i celé koncepce výsledného konstrukčního návrhu.

Cílem práce je navrhnout funkční stroj, jehož stavbu by bylo možné reálně realizovat. Je nutné dodržet všechny požadavky, které jsou dány v zadání, ale také ty, které vyplývají z dané problematiky obou technologií. V neposlední řadě je nutné při konstrukci myslet na ekonomické hledisko, spolehlivost, servisovatelnost a další oblasti, které jsou pro potenciálního zákazníka na tolik přesvědčivé a zásadní, aby si stroj zakoupil a dal všem činnostem od samotné řešerše až po finální oživení ten pravý smysl.

2 MOTIVACE

V bakalářské práci jsem se zabýval konstrukcí jednoúčelového automatizovaného stroje, který měl za úkol správně orientovat a následně vkládat dílce do formy vstřikovacího lisu. Také jako praktikant v konstrukční kanceláři se zabývám konstrukcí automatizovaných strojů, a proto mě možnost zabývat se odlišnou problematikou, a to problematikou 3D tisku a CNC obrábění, přišla velmi zajímavá.

S 3D tiskem metodou FDM mám osobní zkušenost, protože jsem sám vlastníkem 3D tiskárny. U 3D tiskárny jsem řešil vše od prvotního sestavení, přes odladění prvního tisku až po servis a údržbu.

Problematika CNC obrábění je mnohem komplexnější obor, avšak v kategorii „malých modelářských frézek“ dochází k mnoha konstrukčním ústupkům (i nežádoucím), čehož jsou důkazem již dostupné stroje na trhu.

Spojení 3D tisku a CNC frézování je velké téma. Navrhnout stroj, který bude funkčním a rozumným kompromisem mezi oběma technologiemi je velkou výzvou.

Mojí snahou bylo mimo splnění zadání práce objektivně posoudit, zda tato kombinace dvou technologií má smysl, a umožnit dalším konstruktérům a modelářům nahlédnout do této práce, kde získají komplexní ucelený přehled o této problematice, což jim ve výsledku může ušetřit spoustu času a nemálo financí.

3 ANALÝZA ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Analýza samostatných CNC frézek a samostatných 3D tiskáren, které jsou již dostupné na trhu, není z hlediska obsáhlosti práce (konstrukčně zaměřené) zde uvedena. Prioritou je zaměřit se na již na trhu dostupné multifunkční CNC stroje, které nejsou všeobecně tolik známé, protože jejich vývoj a prosazování na trhu probíhá relativně krátkou dobu.

Tato analýza konkrétních multifunkčních strojů je však bezpodmínečně nutná, protože na základě studie již nabízených strojů lze předejít mnoha chybám (konstrukčním i technologickým) u nově navrhovaného stroje. Ačkoli se v počátcích vývoje nového stroje může analýza konkurenčních strojů jevit jako zbytečná a zdržující, tak při reálné konstrukční práci a následné realizaci lze díky ní ve výsledku ušetřit mnoho času i financí.

Nejdříve je však nutné vysvětlit základní pojmy a principy technologií, které jsou pro celou práci zcela zásadní.

3.1 Pojem multifunkční CNC modelářská frézka

Tímto pojmem je myšlen CNC stroj, který kromě frézování (včetně vrtání atd.) umožňuje provádět více než jednu technologickou operaci. V rámci této diplomové práce je přidánou technologií 3D tisk metodou FDM.

3.2 3D Tisk – princip metody FDM

Jedná se o technologii, kde vstupním materiálem je struna (daných materiálových vlastností), která je dále přes podávací ústrojí dopravována k trysce. Tryska je nahřívána, aby materiál dosáhl polotekutého stavu. Řízením podávacího ústrojí je již natavená hmota dávkována na tiskovou podložku (Obr. 1). Geometrie objektu je dána pohybem tiskové hlavy dle instrukcí z řídicího systému [1, 2].

Spojením metod 3D tisku a CNC frézování vznikne stroj, který je schopen již vytištěný objekt ihned obrobít (rovinné plochy bez stop 3D tisku, přesné válcové otvory pro ložiska atd.).

Problematika technologie 3D tisku je velice rozsáhlá, a proto bude blíže popsána na již konkrétním řešení daného problému, který je součástí této práce.



Obr. 1) Nanášení vrstev nataveného materiálu (pohled na strukturu) [1]

3.3 Stroj ZMorph VX

Jedná se o stroj (Obr. 2), který díky výměnným hlavám umožňuje:

- Klasický 3D tisk
- Dvoubarevný 3D tisk pomocí duální tiskové hlavy (dva podavače se společnou tryskou)
- Laser (pro gravírování i řezání)
- Frézování pomocí frézovacího vřetena

Dle dostupné technické dokumentace [3] je rám stroje složen z tenkých hliníkových desek. Celý „příčník“ v ose Z (vertikálním směru) je veden lineárním valivým vedením v podobě vodicích nepodepřených tyčí (na každé straně), kde zdvih zajišťují trapézové šrouby taktéž na každé straně. Pohon je pro každou osu řešen zvlášť.

Lineární valivé vedení v podobě vodicích nepodepřených tyčí je realizováno i v horizontální ose Y (příčníku). Pohyb v této ose je realizován přes ozubený řemen.

Pohyb stolu je při bližším pohledu řešen na miniaturním valivém prizmatickém lineárním vedení, konkrétně na dvou kolejnicích. Krouticí moment od krokového motoru je poté přenášen na dva ozubené řemeny podél každé kolejnice.

Daná konstrukce dle výrobce umožňuje obrábět všechny druhy dřeva, polykarbonát, měděné lamináty, pěnu a různé, podobně na obrábění náročné, kompozity. Z hlediska konstrukce lze již při prvním pohledu spatřit některé nedostatky. Např. při frézování v polovině výšky pracovního rozhraní jsou síly zachycovány přesně uprostřed vodicích tyčí, které jsou velmi malého průřezu. Dalším problémem jsou ozubené řemeny o velikosti, které jsou používány na strojích zaměřených pouze na 3D tisk. Všechny tyto nedostatky ovlivňují tuhost stroje a vedou ke vzniku vibrací, které mají za následek rychlejší opotřebovávání nástrojů [3,4].



Obr. 2) Multifunkční ZMorph VX (vlevo 3D tisk, vpravo frézování) [4]

Parametry stroje, které nejlépe popisují možné využití stroje, jsou zobrazeny na následující tabulce (Tab. 1).

Tab 1) Parametry multifunkčního stroje ZMorph VX [4]

Parametry stroje ZMorph VX				
Zaměření	Parametr (popis)		Hodnota	Jednotky
Frézování	Obráběný materiál		Dřevo, plast atd.	[–]
	Maximální velikost obrobku	Osa X	250	[mm]
		Osa Y	235	[mm]
		Osa Z	165	[mm]
	Maximální průměr nástroje		3	[mm]
3D tisk	Tiskový materiál s teplotou tavení do		250	[°C]
	Velikost tiskové plochy	Osa X	230	[mm]
		Osa Y	230	[mm]
		Osa Z	165	[mm]
	Teplota vyhřívané podložky		?	[°C]
Společné vlastnosti	Rychloposuv	Osa X	30	[m · min ⁻¹]
		Osa Y	30	[m · min ⁻¹]
		Osa Z	?	[m · min ⁻¹]
	Napájecí napětí		230	[V]
	Jištění		? (max 16)	[A]
	Šířka stroje (pro stěhování)		555	[mm]
	Přesnost polohování		?	[mm]
	Hmotnost		20	[kg]
	Cena (včetně DPH)		118800	[Kč]
Hodnota nahrazená znakem „?“ nebyla u daného stroje uvedena				

Bezespornou výhodou je udávaná rychlost posuvu až 500 mm/s (v osách X a Y), která se kladně projeví na době tisku (předpokladem je výborná konstrukce tiskové hlavy). O řízení stroje se dle dostupných údajů stará řídicí systém Voxelizer, který je plně kompatibilní se standardními nástroji pro vytváření programu (instrukcí) ve formě G-kódu. Svou konstrukcí a uvedenými parametry je určen spíše pro 3D tisk a nenáročné frézování dřeva či plastu s malým úběrem materiálu [3,4].

Cenu 118800 Kč (dle dodavatele Elegant3d [4]) nejspíše akceptuje jen ten, kdo využije všechny funkce, a hledá kompaktní a designové řešení do malé kanceláře pro jednoduché, spíše reprezentativní aplikace [3,4].

3.4 Stroj Diabase CNC LITE H5-400A

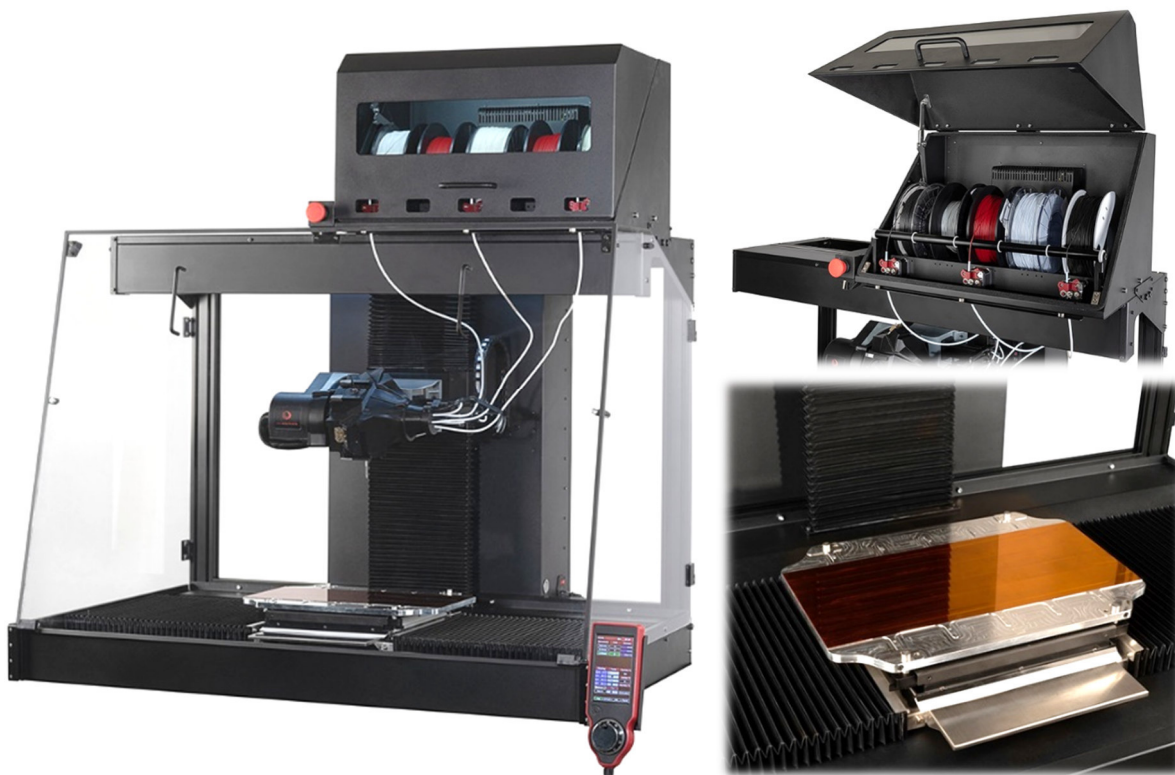
Jedná se o malou stojanovou frézku (tiskárnu) s křížovým stolem (Obr. 3). Výrobce je společnost Diabase Engineering, která sídlí ve Spojených státech amerických (rozměrové údaje jsou přepočítány).

Multifunkční stroj (v provedení „LITE“) je dodáván s příslušenstvím, jehož součástí jsou:

- 3 tiskové hlavy a 2 frézovací hlavy, které jsou součástí revolverového držáku nástrojů, a které umožňují automatickou výměnu nástrojů
- Stanice pro automatické čištění trysek
- Zásobník cívek s materiálem fungující jako vysoušecí box
- Nástrojová dotyková sonda

Stroj má dvě poháněné hlavy, které jsou součástí revolverového držáku nástrojů. Nástrojová dotyková sonda umožňuje naskenovat povrch předmětu a v automatickém módu je schopna vyhledávat středy rotačních těles, detekovat hrany, a především měřit rovinnost tiskové podložky (referovat osu Z). Dle výrobce probíhá také automaticky měření délky nástroje a zanesení tohoto údaje do řídicího systému stroje. Řídicí systém stroje umožňuje dodatečné vybavení stroje čtvrtou a pátou osou (např. rotační stůl v kombinaci s úhlovou nástrojovou hlavou) [5].

Z důvodu téměř dokonalého krytování nelze posoudit konstrukci jako u předešlého stroje, nejvíce charakterizující je proto výpis parametrů uvedený v tabulce (Tab. 2).



Obr. 3) Stroj Diabase CNC LITE H5-400A s detailním vyobrazením pracovního stolu a zásobníku tiskového materiálu [5]

Tab 2) Parametry multifunkčního stroje CNC LITE H5-400A [5]

Parametry stroje CNC LITE H5-400A				
Zaměření	Parametr (popis)		Hodnota	Jednotky
Frézování	Obráběný materiál		Dřevo, plast, slitiny hliníku	[–]
	Maximální velikost obrobku	Osa X	416	[mm]
		Osa Y	186	[mm]
		Osa Z	375	[mm]
	Maximální průměr nástroje		3	[mm]
3D tisk	Tiskový materiál s teplotou tavení do		300	[°C]
	Velikost tiskové plochy	Osa X	416	[mm]
		Osa Y	186	[mm]
		Osa Z	375	[mm]
	Teplota vyhřívané podložky		100	[°C]
Společné vlastnosti	Rychloposuv	Osa X	12	[m · min ⁻¹]
		Osa Y	12	[m · min ⁻¹]
		Osa Z	3	[m · min ⁻¹]
	Napájecí napětí		230	[V]
	Jištění		10	[A]
	Šířka stroje (pro stěhování)		910	[mm]
	Přesnost polohování		0,005	[mm]
	Hmotnost		120	[kg]
	Cena (bez cla a DPH)		11750	[USD]
Hodnota nahrazená znakem „?“ nebyla u daného stroje uvedena				

Stroj disponuje pro modelářské účely relativně velkou pracovní plochou, především rozsah v ose Z je u 3D tiskáren nadstandardní. Velikosti rychloposuvů jsou i v kategorii běžných 3D tiskáren vyhovující, avšak velikosti zrychlení mající vliv na celkovou dynamiku nebylo možné dohledat [5].

Při hmotnosti 120 kg lze prohlásit, že stroj byl už od začátku konstruován i pro obrábění, nikoli pouze pro 3D tisk s možností lehkého gravírování. Cena (po přepočtu) 247700 Kč je za zde uvedený stroj ve třiosém provedení. Výrobce také umožňuje nakonfigurování stroje dle konkrétních požadavků. Konkrétně je možné si připlatit za výkonnější vřetena, různé varianty upínacích přípravků a také za zásobník nástrojů o 14 pozicích [5].

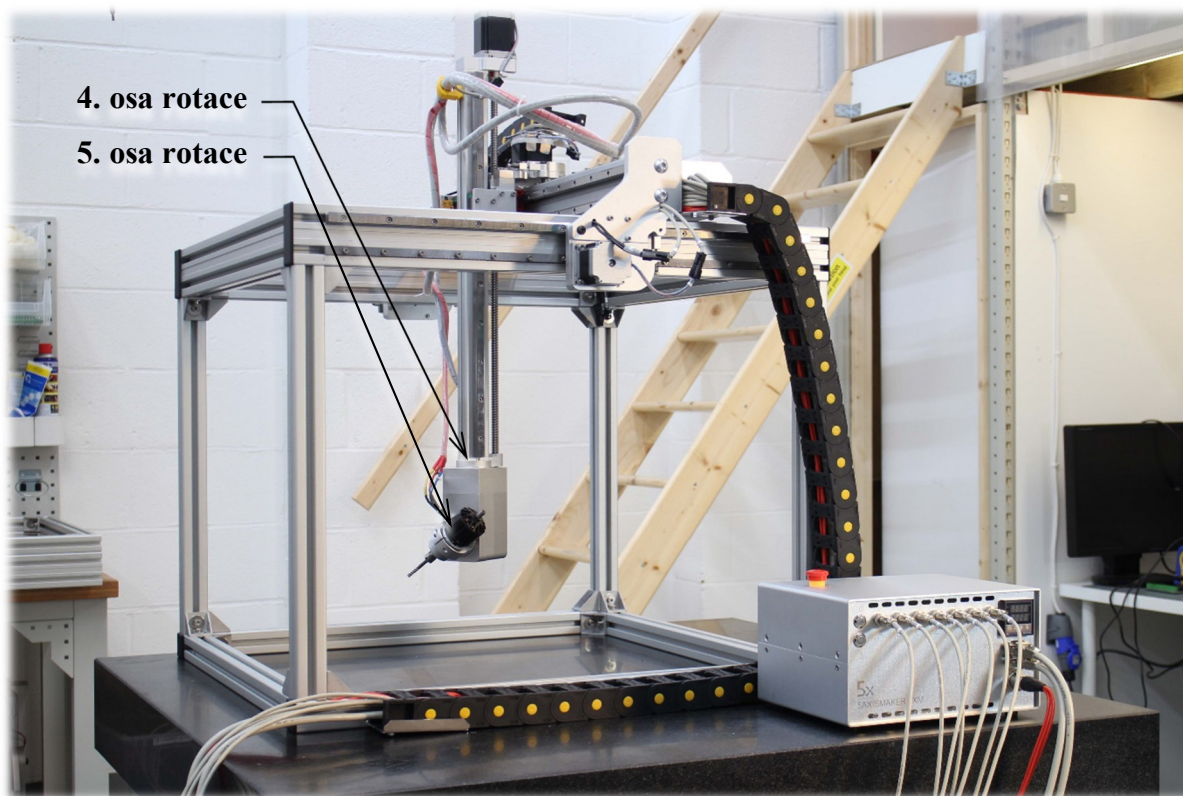
3.5 Stroj 5AXISMAKER

Jedná se o stroj výrobce 5AXISWORKS LTD vyráběný ve Velké Británii. Už z názvu vyplývá, že zde uvedený multifunkční stroj umožňuje frézovat v 5 osách (Obr. 4). Konstrukce je řešena jako stavebnice z hliníkových profilů, kterou si lze rozměrově v osách X, Y a Z nakonfigurovat. Konstrukce umožňuje obrábět pouze plastové a dřevěné materiály, pro které je tuhost, která je dána uspořádáním profilů do tvaru krychle, dostačující [6,7].

Vedení všech os je řešeno prizmatickým lineárním valivým vedením. Posuvy v osách X a Y jsou realizovány pomocí ozubeného pastorku a hřebene s jemným ozubením. Osa X je poháněna dvěma pohony na každé straně (horní gantry). Krokové motory s ozubeným pastorkem jsou uloženy na kyvném mechanismu, kde přitlačení pastorku k ozubenému hřebenu zajišťuje předepjatá pružina. V případě poruchy „elektrické osy“ (souvislého řízení obou pohonů pro pohyb jedné osy) dojde k navýšení krouticího momentu pohonů, jejichž reakci již pružina nezachytí a zabrání tím mechanické kolizi (případně i destrukci). Posuv v ose Z je řešen kuličkovým šroubem. Čtvrtá a pátá osa rotace je součástí nástrojové hlavy, která je umístěna na konci smýkadla (viz Obr. 4) [6].

Řídicí systém stroje není dodáván výrobcem, ale je nutné si jej zakoupit samostatně. Doporučován je software Mach3, který již umožňuje řízení všech pěti os. Generování G-kódu poté může probíhat v každém CAMU, pro který je již předpřipraven postprocesor [6,7].

Výměna nástrojů (tiskové hlavy, vřetena, měřicí sondy atd.) je prováděna ručně. Uchycení je řešeno v jednoduché objímce fungující jako svěrný spoj [6,7].



Obr. 4) Stroj 5AXISMAKER ve variantě XL o pracovní ploše ve tvaru krychle o hraně 600 mm (střední velikost produktu) [6]

Tab 3) Parametry multifunkčního stroje 5AXISMAKER 5xm600XL [6]

Parametry stroje 5AXIS MAKER 5xm600XL				
Zaměření	Parametr (popis)		Hodnota	Jednotky
Frézování	Obráběný materiál		Dřevo, plast atd.	[–]
	Maximální velikost obrobku	Osa X	600	[mm]
		Osa Y	600	[mm]
		Osa Z	600	[mm]
	Maximální průměr nástroje		4	[mm]
3D tisk	Tiskový materiál s teplotou tavení do		?	[°C]
	Velikost tiskové plochy	Osa X	600	[mm]
		Osa Y	600	[mm]
		Osa Z	600	[mm]
	Teplota vyhřívané podložky		?	[°C]
Společné vlastnosti	Rychloposuv	Osa X	15	[m · min ⁻¹]
		Osa Y	15	[m · min ⁻¹]
		Osa Z	6	[m · min ⁻¹]
	Napájecí napětí		230	[V]
	Jištění		? (max 16)	[A]
	Šířka stroje (pro stěhování)		780	[mm]
	Přesnost polohování		0,036	[mm]
	Hmotnost		93	[kg]
	Cena (bez DPH a cla)		7000	[GBP]
Hodnota nahrazená znakem „?“ nebyla u daného stroje uvedena				

Při volbě frézky ve variantě XL je výška pracovního prostoru 600 mm (Tab. 3). Výrobce u tohoto typu doporučuje při frézování tvrdších materiálů, především dřeva, podložit dílec tak, aby nebylo vyložení osy Z kritické z hlediska tuhosti [6,7].

Stroj je dodáván bez bezpečnostního krytování, pracovního stolu, vyhřívání podložky a řídicího systému. K ceně, která po přepočtu činí 206150 Kč, je tedy nutné počítat s dodatečnou investicí do dalších nezbytných periférií [6].

3.6 Shrnutí

Vybrané stroje byly shledány jako nejnázornější reprezentanti této úzké skupiny CNC multifunkčních strojů. Nelze je přímo porovnávat, protože každý stroj je určen pro jiné využití a v konečném důsledku i jiného zákazníka.

Analýza řešené problematiky je proto promítána do všech následujících kapitol této práce, kde je účelně rozebírána na konkrétní konstrukční či technologické problematice.

4 VOLBA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ

Nyní je vhodné přejít k volbě parametrů, které by měl právě konstruovaný stroj splňovat (Tab. 4). K tomuto bližšímu stanovení požadavků na stroj slouží získané informace z řešerše této problematiky a také vlastní nabyté zkušenosti v této oblasti. Je nutné se vžít do role potenciálních zákazníků a zvolit parametry vhodně tak, aby byly pro většinu zákazníků žádoucí a stroj tak na trhu obstál.

Snahou bude výrobek směřovat např. pro konstrukční firmy (kanceláře), které nedisponují výrobními kapacitami, nebo pro zkušené a náročné modeláře, kteří však nemají mnoho prostoru pro samostatnou CNC frézku a samostatnou 3D tiskárnu.

Z tohoto předpokladu využití vychází hned několik požadavků. Mezi zásadní požadavky patří velikost napájecího napětí, jištění a také celková šířka stroje, aby stroj mohl být umístěn i v místnosti se vstupními dveřmi o šířce 900 mm. Samozřejmostí je vyhřívaná pracovní plocha, aby na ní vytištěný dílec pevně držel během frézování.

Tab 4) Volba parametrů navrhovaného multifunkčního stroje

VOLBA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ				
Zaměření	Parametr (popis)		Hodnota	Jednotky
Frézování	Obráběný materiál		Dřevo, plast, slitiny Al, Zn	[–]
	Maximální velikost obrobku	Osa X	450	[mm]
		Osa Y	450	[mm]
		Osa Z	180	[mm]
	Maximální průměr nástroje		10 a větší	[mm]
	Výsledná přesnost obrobku		0,05	[mm]
3D tisk	Tiskový materiál s teplotou tavení do		300	[°C]
	Velikost tiskové plochy	Osa X	450	[mm]
		Osa Y	450	[mm]
		Osa Z	160	[mm]
	Teplota vyhřívané podložky		80 a více	[°C]
Společné vlastnosti	Rychloposuv	Osa X	12	[m · min ⁻¹]
		Osa Y	12	[m · min ⁻¹]
		Osa Z	10	[m · min ⁻¹]
	Napájecí napětí		230 V	[V]
	Jištění		16	[A]
	Maximální šířka stroje (stěhování)		max 900	[mm]
	Přesnost polohování (elektronické rozlišení závislé na reálném nastavení)		max 0,02	[mm]

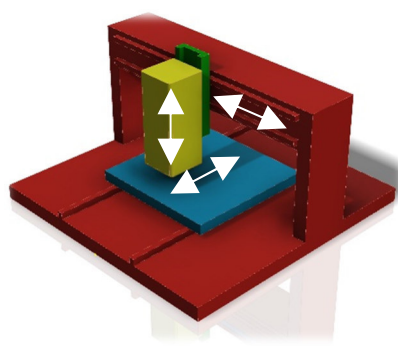
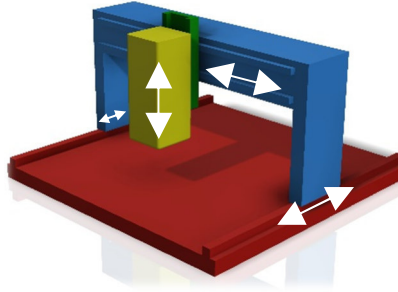
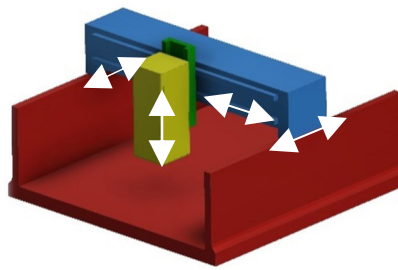
5 VOLBA KINEMATICKÉHO USPOŘÁDÁNÍ STROJE

Po rešerši, která se zabývala konkrétními „potenciálně konkurenčními stroji“, a volbě vstupních parametrů stroje, lze přejít k volbě nejvhodnější varianty kinematického uspořádání stroje. V úvahu připadá spousta možných koncepcí (Tab. 5), ale nelze s absolutní jistotou bez většího zamyšlení vybrat jedno řešení, které je dokonalé.

Pokud jsou do úvahy brány dva samostatné stroje (CNC frézka a 3D tiskárna), tak volba koncepce není tolik složitá a lze ji systematicky a osvědčenými postupy objektivně zvolit.

Každý ze strojů má však diametrálně odlišné požadavky na konstrukci. Jediným řešením je nalézt společný průsečík vlastností nyní konstruovaného multifunkčního stroje tak, aby výsledná kvalita produktu stroje (obrobek nebo 3D výtisk) odpovídala takové kvalitě, jako by se produkt vyráběl na dvou samostatných strojích.

Tab 5) Varianty kinematického uspořádání stroje

VARIANTY KINEMATICKÉHO USPOŘÁDÁNÍ STROJE	
1. VARIANTA - Portálová frézka (3D tiskárna) s posuvným stolem	
Pevný portál při vhodném dimenzování zaručuje vysokou tuhost konstrukce. Uspořádání os umožňuje pohon všech os pomocí tří pohonů. Odvod třísek (odpadové hospodářství) lze u této varianty nejsnáze řešit. V případě nutnosti masivního stolu jsou kladeny vyšší nároky na pohon, aby byla splněna požadovaná rychlost a dynamika. Varianta s křížovým stolem nebyla uvažována z důvodu vysoké prostorové náročnosti a nežádoucího vlivu při 3D tisku tenkých vysokých objektů.	
2. VARIANTA - Portálová frézka (3D tiskárna) typu spodní gantry	
Varianta spodní gantry s pevným stolem je velmi často vídaná varianta u modelářských frézek. Oproti předchozí variantě je při dané pracovní ploše kladen menší nárok na zástavbový prostor. Oproti konstrukci typu horní gantry je větší úspora materiálu (užší bočnice portálu oproti stojanům v celé délce). Vedení v podélné ose lze umístit na plochu stolu, nebo po jeho bocích. Především bočnice je nutné vhodně dimenzovat, u většiny modelářských konstrukcí jsou totiž zdrojem snížené tuhosti a vibrací.	
3. VARIANTA - Portálová frézka (3D tiskárna) typu horní gantry	
Jako u varianty spodní gantry je i zde nutné použít z důvodu eliminace rizika „křížení příčnicku“ pro podélnou osu dva pohony (lze řešit i jiným mechanickým způsobem). Díky „mohutným“ stojanům lze dosáhnout vysoké tuhosti. U tohoto typu konstrukce lze dosáhnout ze všech variant nejnížší hmotnosti pohybujících se částí (menší nároky na dynamiku pohonu atd.). Nevýhodou je horší přístup obsluhy do pracovního prostoru, který lze ale vhodnou konstrukcí značně eliminovat.	

Než dojde k volbě nejvhodnější varianty kinematického uspořádání, je nutné uvést nejzásadnější požadavky na konstrukci stroje, které se odvíjí od výrobní technologie (Tab. 6).

Tab 6) Konstrukční požadavky a omezení dle výrobní technologie

KONSTRUKČNÍ OMEZENÍ V ZÁVISLOSTI NA VÝROBNÍ TECHNOLOGII	
3D tisk	CNC frézování
Malá hmotnost pohybujících se částí (vysoká dynamika, menší nárok na výkonost pohonů)	Předepnuté lineární vedení a kuličkové šrouby (silné pohony)
Ideálně nehybná tisková podložka (nejlépe pouze v ose Z kolmé na podložku)	Vyšší nároky na výslednou přesnost (oproti technologii 3D tisku FDM) a zpracování stroje
Čistota pracovní plochy (bez mastnot a prachu)	Požadavek na vysokou tuhost konstrukce

5.1 Kritéria multikriteriální analýzy

Pro vyhodnocení všech tří variant byla zvolena metoda rozhodování dle kritérií, kde každé kritérium má svoji váhu (1-10). Posléze bude každá varianta dle těchto nastavených kritérií hodnocena bodováním (1-10 bodů), kde hodnota 10 bodů znamená nejlepší hodnocení. Po komplexním obodování všech variant kinematického uspořádání dle všech kritérií je proveden výpočet, kde varianta s nejvyšším počtem bodů bude sledována jako varianta nejlepší. Hodnocení bude probíhat dle následujících kritérií:

- Velikost zástavbového prostoru (při uvažované stejné velikosti pracovní plochy)
- Hmotnost pohybujících se částí stroje (vliv na dimenzování pohonu atd.)
- Náročnost na konstrukci a výrobu s ohledem na docílení požadované tuhosti a přesnosti
- Finanční náročnost (odhadované množství materiálu, počet pohonů atd.)

5.2 Vyhodnocení kritérií multikriteriální analýzy

V následující tabulce (Tab. 7) je provedeno bodování jednotlivých konstrukčních variant a následný součet bodů každé z nich.

Tab 7) Zhodnocení kritérií

VYHODNOCENÍ DLE MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZY				
Hodnotící kritérium	Váha hodnocení	První varianta	Druhá varianta	Třetí varianta
Velikost zástavbového prostoru	7	4	8	8
Hmotnost pohybujících se částí	9	7	6	8
Náročnost na konstrukci a výrobu	6	8	6	7
Finanční náročnost	7	6	5	5
Celkové hodnocení	-	181	181	205

Dle celkového hodnocení vychází třetí varianta jako nejvhodnější. Pevný stůl ve spojení s nízkou hmotností pohybujících se částí jsou předpokladem úspěšné konstrukce i provozu.

6 KONSTRUKČNÍ NÁVRH STROJE

Konstrukční návrh stroje vychází ze stanovených vstupních parametrů a ze zvolené koncepce. Tato kapitola úzce souvisí se samotným konstrukčním návrhem, který je v několika iteracích v souladu s výpočty upravován pro docílení optimalizované a funkční konstrukce.

6.1 Návrh vřetena

Vřeteno je srdce obráběcího stroje, od kterého se odvíjí další parametry stroje. Zde bude výpočet prováděn na technologické operaci frézování a vrtání, což jsou nejčastější reprezentanti obráběcích operací, na kterých lze výpočet a návrh objektivně realizovat.

6.1.1 Specifikování referenčních materiálů a nástrojů

Stroj je konstruován jako univerzální. Obrábět má materiály od plastu, přes dřevo až po slitiny hliníku. Pro výpočet je nutné specifikovat vlastnosti a parametry obráběného materiálu, při jehož obrábění dochází k největšímu namáhání stroje. Zatímco pro obrábění měkkého dřeva a plastů je jednou z nejpodstatnějších veličin velikost otáček nástroje (vřetena), pro obrábění slitin je již nutné posuzovat vhodnost vřetena především z hlediska momentové zátěže a výkonu. Z tohoto důvodu bude výpočet orientován na obrábění hliníkových slitin, které se dělí do několika materiálových podskupin dle obsahu křemíku ve slitině (Tab. 8):

Tab 8) Rozdělení a vlastnosti slitin hliníku [8]

SLITINY HLINÍKU			
Materiálová podskupina	Tvrdost [HB]	Měrná řezná síla k_{c1} [N/mm ²]	Konstanta měrné řezné síly m_c [–]
Slitiny Al – Si; kde Si je ≤ 1 %	100	650	0,25
Slitiny Al – Si; kde Si je ≥ 1 % a ≤ 13 %	90	700	0,25
Slitiny Al – Si; kde Si je ≥ 13 %	130	700	0,25

Hodnoty tvrdostí jsou uvedeny pro již tepelně zpracované polotovary hliníkových slitin. Reálná tvrdost materiálu u běžně dostupných polotovarů může být téměř poloviční. Následující výpočet a konstrukce stroje bude vycházet ze slévárenské slitiny Al-Si s obsahem křemíku větší než 13 %, při jejímž obrábění by byl stroj teoreticky nejvíce zatěžován [8].

6.1.2 Výpočet řezných sil při frézování

Vybraná slitina klade vysoké nároky na nástroj. Vzhledem k vyšší hodnotě tvrdosti materiálu je omezen i výběr cenově dostupných fréz. Z katalogů výrobců a s ověřením pomocí webového konfigurátoru CoroPlus ToolGuide byla shledána jako nejvhodnější monolitní karbidová fréza. Jedná se o čelní válcovou frézu s označením CoroMill Plura 2P122-1000-NC H10F, která je nabízená společností Sandvik Coromant (Tab. 9) [8,9,10].

Výrobce uvádí axiální hloubku řezu až 15 mm. Pokud by tato hodnota byla požadavkem na nový stroj, znamenalo by to větší ekonomické výdaje z důvodu nutnosti výkonnějšího vřetena, diametrálně mohutnější konstrukce a vyšší hmotnosti pohybujících součástí. Možnost 3D tisku metodou FDM by tudíž neměla z důvodu značných omezení na tomto stroji téměř žádný smysl, a proto je axiální hloubka řezu upravena na hodnotu 2 mm [8,9].

Tab 9) Řezné podmínky pro frézování [8,9,10]

ŘEZNÉ PODMÍNKY PRO FRÉZOVÁNÍ			
Fréza (označení): CoroMill Plura 2P122-1000-NC H10F		Výrobce: Sandvik Coromant	
Parametr (popis)	Symbol	Hodnota	Jednotky
Průměr nástroje (řezný)	D_{fr}	10	[mm]
Počet břitů	z_{fr}	2	[–]
Posuv na zub	f_{zfr}	0,06	[mm]
Řezná rychlost	v_{cfr}	287	$[m \cdot min^{-1}]$
Úhel šroubovice	λ_{fr}	25	[°]
Nástrojový úhel čela	γ_{fr}	17	[°]
Nástrojový úhel hlavního ostří	κ_{fr}	90	[°]
Axiální hloubka řezu	A_{Pfr}	2	[mm]
Radiální hloubka řezu	A_{Efr}	10	[mm]



Otáčky vřetena (veškeré výpočty převzaty z literatury [11, 12])

$$n_f = \frac{1000 \cdot v_{cfr}}{D_{fr} \cdot \pi} = \frac{1000 \cdot 287}{10 \cdot \pi} = 9135 \frac{1}{min} \quad (1)$$

Rychlost posuvu

$$v_f = n_f \cdot z_{fr} \cdot f_{zfr} = 9135 \cdot 2 \cdot 0,06 = 1096,2 \frac{mm}{min} \quad (2)$$

Střední tloušťka třísky při frézování

$$h_m = \frac{f_{zfr} \cdot \sin(\kappa_{fr}) \cdot 180 \cdot A_{Efr}}{\pi \cdot D_{fr} \cdot \arcsin\left(\frac{A_{Efr}}{D_{fr}}\right)} = \frac{0,06 \cdot \sin(90) \cdot 180 \cdot 10}{\pi \cdot 10 \cdot \arcsin\left(\frac{10}{10}\right)} = 0,038 \text{ mm} \quad (3)$$

Specifická řezná síla

$$k_{cf} = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{fr}}{100}\right) = 700 \cdot 0,038^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{17}{100}\right) = 1315,9 \frac{N}{mm^2} \quad (4)$$

kde: k_{c1} [N/mm²] je měrná řezná síla a m_c [–] je konstanta měrné řezné síly

Požadovaný výkon vřetena při frézování

Zde je nejlépe vyobrazena lineární závislost axiální hloubky řezu na požadovaný výkon vřetena.

$$P_f = \frac{v_f \cdot A_{Pfr} \cdot k_{cf} \cdot A_{Efr}}{6 \cdot 10^4} = \frac{1096,2 \cdot 2 \cdot 1315,9 \cdot 10}{6 \cdot 10^4} = 480,8 \text{ W} \quad (5)$$

Řezná síla

$$F_{cf} = k_{cf} \cdot A_{Pfr} \cdot f_{zfr} = 1315,9 \cdot 2 \cdot 0,06 = 157,9 \text{ N} \quad (6)$$

Krouticí moment

$$M_{Kf} = F_{cf} \cdot \frac{D_{fr}}{2 \cdot 10^3} = 157,9 \cdot \frac{10}{2 \cdot 10^3} = 0,79 \text{ N.m} \quad (7)$$


6.1.3 Výpočet řezných sil při vrtání

Pro vrtání vybrané slitiny byl za pomoci katalogů a webového konfigurátoru CoroPlus ToolGuide vybrán monolitní karbidový vrták CoroDrill s označením 860.1-0600-016A0-GM X1BM, který je nabízen taktéž společností Sandvik Coromant (Tab. 10) [8,13].

Při vrtání hliníkových slitin se bude běžné vřeteno používané u modelářských frézek pohybovat v nízkém spektru otáček, kde bývá velmi nízký výkon. Pokud by vřeteno bylo z hlediska výkonu v těchto otáčkách nedostačující, lze řezné podmínky upravit např. snížením posuvu na otáčku.

Tab 10) Řezné podmínky pro vrtání [8,13]

ŘEZNÉ PODMÍNKY PRO VRTÁNÍ			
Vrták (označení): 860.1-0600-016A0-GM X1BM			Výrobce: Sandvik Coromant
Parametr (popis)	Symbol	Hodnota	Jednotky
Průměr nástroje (řezný)	D_{vr}	6	[mm]
Počet břitů	z_{vr}	2	[–]
Posuv na otáčku	f_{zvr}	0,218	[mm]
Řezná rychlost	v_{cvr}	145	[m · min ⁻¹]
Nástrojový úhel čela	γ_{vr}	30	[°]
Nástrojový úhel hlavního ostří	κ_{vr}	70	[°]



Otáčky vřetena

$$n_v = \frac{1000 \cdot v_{cvr}}{D_{vr} \cdot \pi} = \frac{1000 \cdot 145}{6 \cdot \pi} = 7693 \frac{1}{\text{min}} \quad (8)$$

Posuv na břit

$$f_{zv} = \frac{f_{zvr}}{z_{vr}} = \frac{0,218}{2} = 0,109 \text{ mm} \quad (9)$$

Specifická řezná síla

$$\begin{aligned} k_{cv} &= k_{c1} \cdot (f_{zv} \cdot \sin(\kappa_{vr}))^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{vr}}{100}\right) = \\ &= 700 \cdot (0,109 \cdot \sin(70))^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 866,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Požadovaný výkon vřetena při vrtání

$$P_v = \frac{v_{cvr} \cdot f_{zv} \cdot D_{vr} \cdot k_{cv}}{240} = \frac{145 \cdot 0,109 \cdot 6 \cdot 866,15}{240} = 342,24 \text{ W} \quad (11)$$

Krouticí moment

$$M_{Kv} = \frac{P_v \cdot 30}{\pi \cdot n_v} = \frac{342,24 \cdot 30}{\pi \cdot 7693} = 0,425 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

Rychlost posuvu

$$v_{fv} = f_{zvr} \cdot n_v = 0,218 \cdot 7693 = 1677 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (13)$$

Síla posuvu

$$F_{pv} = 0,5 \cdot k_{cv} \cdot \frac{D_{vr}}{2} \cdot f_{zvr} \cdot \sin(\kappa_{vr}) = 0,5 \cdot 866,15 \cdot \frac{6}{2} \cdot 0,218 \cdot \sin(70) = 266,2 \text{ N} \quad (14)$$

Tloušťka třísky

$$h_D = f_{zv} \cdot \sin(\kappa_{vr}) = 0,109 \cdot \sin(70) = 0,102 \text{ mm} \quad (15)$$

Šířka třísky

$$b_D = \frac{D_{vr}}{2 \cdot \sin(\kappa_{vr})} = \frac{6}{2 \cdot \sin(70)} = 3,19 \text{ mm} \quad (16)$$

Jmenovitý průřez třísky při vrtání do plného materiálu

$$A_D = h_D \cdot b_D = 0,102 \cdot 3,19 = 0,325 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Řezná síla při vrtání

$$F_{cv} = k_{cv} \cdot A_D = 866,15 \cdot 0,325 = 281,5 \text{ N} \quad (18)$$

6.1.4 Volba vřetena

V minulé kapitole bylo analyzováno působení řezných sil při frézování a vrtání. Výsledky, které je nutné znát pro správný výběr vřetena, jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 11).

Tab 11) Shrnutí výsledků působení řezných sil

SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ			
Hledaný parametr	Frézování	Vrtání	Jednotky
Otáčky vřetena	9135	7693	[min ⁻¹]
Krouticí moment vřetena	0,79	0,43	[N.m]
Výkon vřetena	481	342	[W]

Z výsledků je patrné, že operace frézování klade vyšší požadavky na výkon a krouticí moment vřetena, a proto bude metoda frézování především z hlediska velikosti krouticího momentu a výkonu brána jako referenční.

V dnešní době lze již na trhu nalézt mnoho výrobců vřeten (např. HSD, Isel, Mechatron, Teknomotor, Spindtech atd.), kteří nabízejí vhodná vřetena pro danou aplikaci. Aby byla volba konkrétního vřetena systematická a objektivní, je nutno stanovit kritéria a požadavky, dle kterých bude vhodnost vřetena posuzována [14].

Mimo výkon a krouticí moment vřetena (včetně jejich průběhu) je nutné posoudit rozsah otáček. Na rozdíl od větších průmyslových obráběcích strojů pracují malé modelářské frézky s nástroji o menších průměrech, ale ve vyšších otáčkách. Tato volba má jistá omezení např. v omezené velikosti průměru vrtání, protože většina vysokootáčkových vřeten vykazuje dostatečný výkon a krouticí moment při vyšších, pro daný průměr vrtáku již nevhodných otáčkách [14].

Z důvodu, že stroj má být co nejvíce multifunkční a pro obsluhu přívětivý, bylo rozhodnuto pro výběr vřetena, které umožňuje automatickou výměnu nástrojů. Tímto se značně sníží velikost nabídky vřeten na trhu a zvýší se cena, ale např. pro komerční prostředí je automatická výměna nástroje brána jako standardní funkce.

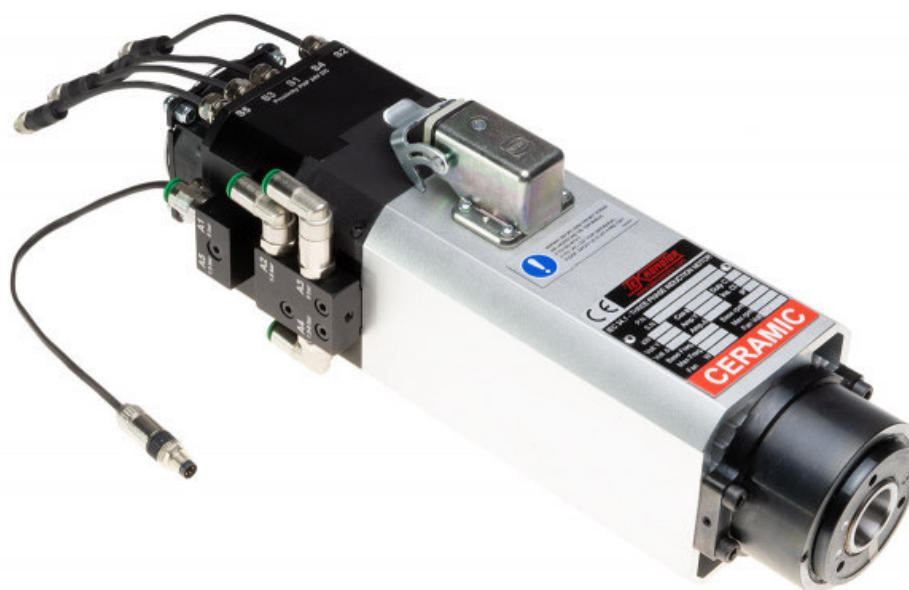
Dále je snahou co nejvíce snížit hmotnost pohybujících se částí, mezi které ve variantě horní gantry patří i vřeteno. Vyšší hmotnost by kladla vyšší nároky na dimenzování pohonů, a to především při 3D tisku, kde stroj pracuje při vyšších posuvových rychlostech. Tento parametr nesmí být ale na úkor tuhosti a přesnosti vřetena.

Aby byl stroj pro potenciálního kupujícího více atraktivní, bylo rozhodnuto pro výběr vřetena od prověřených a renomovaných výrobců. Nelze vyloučit, že by neznámková, většinou čínská vřetena, byla nevhodná, ale nelze se bez vlastní zkušenosti spolehnout na jimi deklarované technické vlastnosti. V případě poruchy a požadavku na možnost servisu je volba značkového vřetena téměř nevyhnutelná.

Dle zde již vypsanych kritérií a dostupných vřeten na trhu bylo vybráno vřeteno od výrobce Teknomotor, které nese označení ATC41-C-2DB-ISO20-SN-HY (Tab. 12) [14,15].

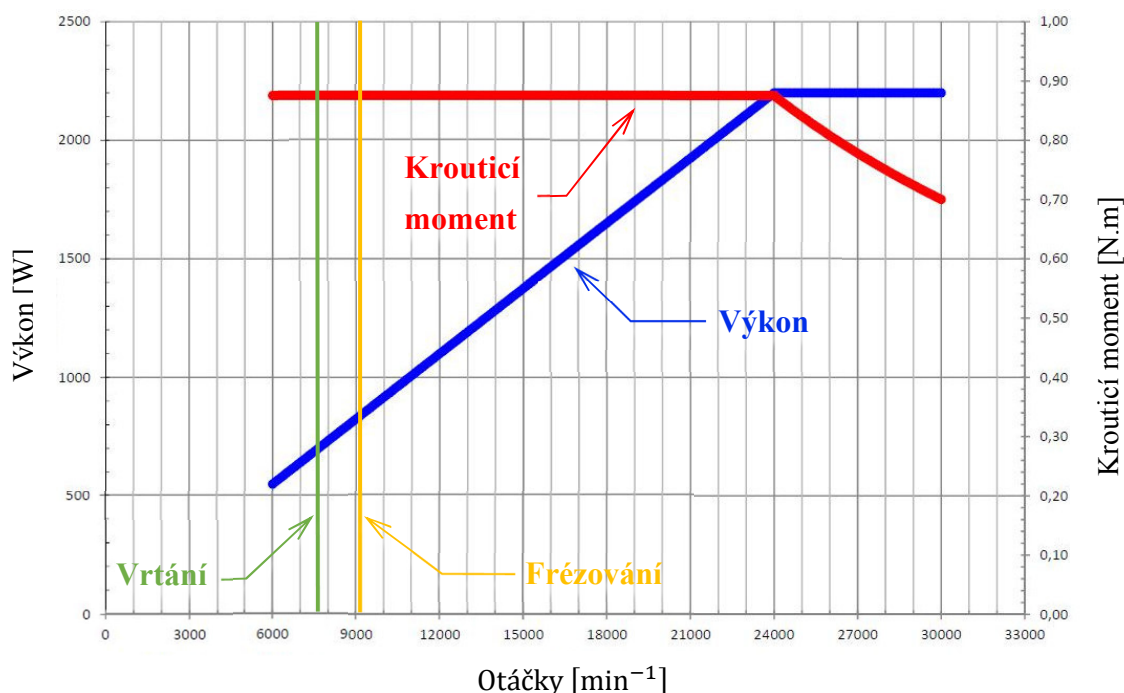
Tab 12) Parametry zvoleného vřetena [14,15]

PARAMETRY ZVOLENÉHO VŘETENA		
Parametr	Hodnota	Jednotky
Výkon	2200	[W]
Kužel	ISO 20	[–]
Napájecí napětí	230	[V]
Maximální odběr proudu	8,4	[A]
Třída ochrany	54	[–]
Jmenovité otáčky	24 000	[min ⁻¹]
Maximální otáčky	30 000	[min ⁻¹]
Hmotnost	6,5	[kg]
Velikost napájecího napětí ventilátoru	24	[VDC]



Obr. 5) Vřeteno Teknomotor s označením ATC41-C-2DB-ISO20-SN-HY [14]

Nejlépe lze vlastnosti vřetena popsat pomocí výkonově-momentové charakteristiky, která je na následujícím obrázku (Obr. 6) vyobrazena.



Obr. 6) Pro přehlednost vizuálně upravené zobrazení výkonově momentové charakteristiky [14]

Mimo vyobrazených křivek charakterizujících průběh výkonu a krouticího momentu jsou v grafu (Obr.6) pomocí svislých čar vyznačeny dvě hodnoty (úrovně) otáček vřetena. Jedna (více vlevo) reprezentuje operaci vrtání a druhá (více vpravo) operaci frézování. Díky tomuto rozboru výkonově-momentové charakteristiky lze posoudit vhodnost vřetena. Přestože výrobce u vybrané frézy uvádí velikost posuvu na zub až 0,13 mm, bylo nutné z důvodu nedostatečného krouticího momentu vřetena snížit velikost posuvu na zub na hodnotu 0,06 mm, s kterou bylo v předešlé výpočtové části pracováno. Dalšího snížení nároku na velikost krouticího momentu vřetena by bylo možné dosáhnout např. snížením axiální hloubky řezu, volbou menšího průměru nástroje atd. Nicméně lze po této úvaze vřeteno považovat za naprosto vyhovující.

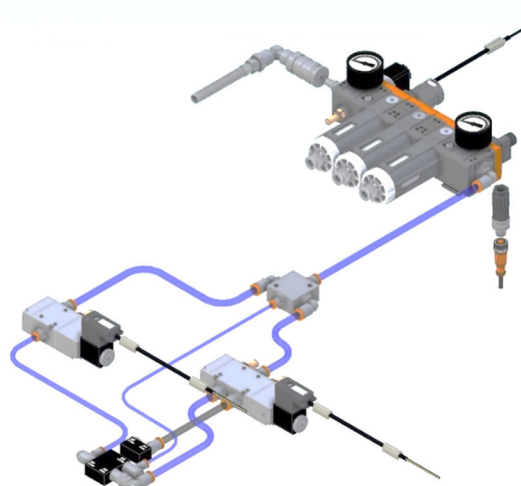
Mimo výkonově-momentovou charakteristiku je vhodné popsat mechanickou strukturu (konstrukci) vřetena. Vřeteno lze provozovat se standardními kleštinovými upínači ER11, ER16 nebo ER20. Z hlediska uspořádání a typu ložisek jsou vřetena od výrobce Teknomotor určena pro radiální nebo radiálně-axiální zatěžování. Dle technické dokumentace se zde vybrané vřeteno dodává pouze v nejvyšší specifikaci s dvěma páry ložisek s kosoúhlým stykem v přední i v zadní části vřetena (technická dokumentace neobsahuje bližší popis) [14,15].

Chlazení je zde řešeno externím ventilátorem napájeným 24 VDC. Na rozdíl od ventilátoru pevně spojeného s hřídelí vřetena je velikost otáček ventilátoru (intenzita chlazení) nezávislá na otáčkách vřetena. Napájení stejnosměrným napětím nevyžaduje významně vyšší nároky na elektroinstalaci, protože zdroje stejnosměrného napětí o této velikosti bude sloužit pro napájení i mnoha dalších periférií (ventilátor extruderu atd.). Mimo externí ventilátor je chlazení podpořeno formou hliníkového tubusu s dutými otvory umožňující proudění vzduchu [14,15].

K zajištění správné funkce a umožnění řízení vřetena je nutné zapojit jej přes frekvenční měnič. Pro tento typ vřetena je přímo výrobcem doporučován typ VFD022E21A od výrobce Delta Electronics (Obr. 7). Tento frekvenční měnič umožňuje připojení pouze do jednofázové sítě o velikosti napětí 230 V (rozfázování na 3x230 V zajišťuje sám). Jeho součástí je potenciometr, kterým lze měnit velikost otáček. V případě CNC obrábění bude ale tato hodnota řídicím systémem regulována pomocí změny napětí (0–10 V) na vstupu frekvenčního měniče. Samozřejmě je integrovaný PID regulátor a EMI filtr, pro jejichž správnou funkci je nutné používat pro zapojení stíněné kabely [14,15,68].



Obr. 7) Frekvenční měnič Delta Electronics typu VFD022E21A [68]



Obr. 8) „Pneumatický balíček“, od společnosti Damen CNC [69]

Automatická výměna nástrojů vyžaduje nutnost přívodu stlačeného vzduchu, jeho regulaci a ovládání. Společnost Damen CNC nabízí řešení formou „pneumatického balíčku“ (Obr. 8), který lze zakoupit a jednoduše dle návodu sestavit. V případě začlenění stroje do zavedeného výrobního prostředí je výhodné sestavit vlastní pneumatické zapojení, kde by úpravná jednotka stlačeného vzduchu mohla být řešená v rámci finanční úspory centrálně (v rámci více strojů, dílny atd.) [15,69].

Dle zde popsaných vlastností vychází toto vřeteno pro danou aplikaci jako nejvhodnější. Hmotnost vřetena 6,5 kg (s kabeláží uváděno 7 kg) je při daných parametrech akceptovatelná a vyvažuje rizika spojená s konstrukcí výměnného mechanismu vřetena za tiskovou hlavu.

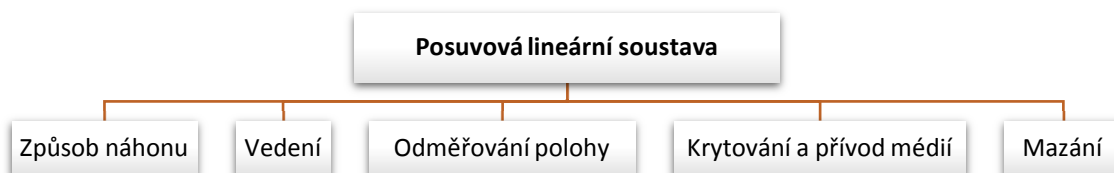
I přes vyšší finanční nároky (viz Tab. 13) zůstává vybráno vřeteno s automatickou výměnou nástrojů. Vyšší investice má opodstatnění ve snaze zkrátit výrobní časy a časové vytížení obsluhy. Vřeteno bez automatické výměny nástrojů má mj. menší zástavbové rozměry, a proto je jeho případná volba v rámci úspory možná bez větších konstrukčních úprav.

Tab 13) Porovnání cen vřeten Teknomotor z nabídky společnosti Damen CNC [15]

POROVNÁNÍ CEN VŘETEN O STEJNÉM VÝKONU (BEZ PŘÍSLUŠENSTVÍ)			
Označení vřetena Teknomotor	Automatická výměna nástrojů	Cena bez DPH	Měna
C41/47-C-DB-P-ER25-HY	Ne	800	[EUR]
ATC41-C-2DB-ISO20-SN-HY	Ano	3500	[EUR]

6.2 Volba komponent lineárních posuvových soustav

Tato kapitola bude věnována návrhu jedné z nejdůležitějších částí obráběcího stroje. Jednotlivé konstrukční oblasti (Obr. 9) musí být navrženy tak, aby stroj jako komplexní celek splňoval vstupní parametry, které byly v této práci definovány. Mimo vstupních parametrů je nutné zvážit mnoho dalších vlivů, jakými jsou např. zástavbové rozměry, nároky na odbornost montáže a v neposlední řadě také finanční náročnost [12].

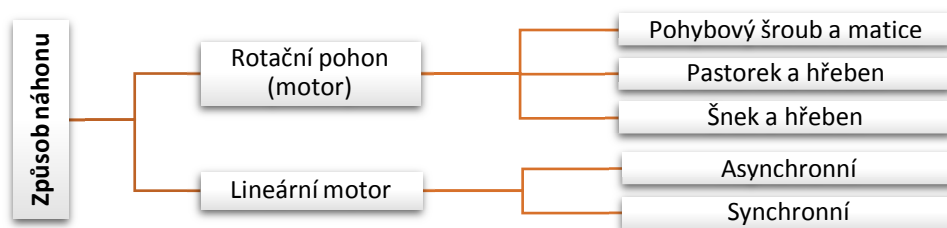


Obr. 9) Zjednodušený pohled na morfologii posuvové soustavy (převzato z [12])

Aby následující rozbor jednotlivých konstrukčních skupin měl nejvíce vypovídající hodnotu, bude úzce zaměřen pouze pro danou aplikaci, a to modelářskou frézku s možností 3D tisku.

6.2.1 Způsob náhonu

U CNC strojů je několik možností, jakým způsobem lze řešit pohybovou soustavu (Obr. 10).



Obr. 10) Možné varianty řešení náhonu (převzato z [12])

Z hlediska zástavbových rozměrů, menších sil, složitějšího způsobu řízení, a především vysoké ceny, je jako nejvhodnější způsob náhonu pro tuto aplikaci shledán rotační pohon, jehož rotační pohyb je následně mechanismem převáděn na pohyb lineární [12].

6.2.2 Volba typu rotačního pohonu

Nejčastěji používané pohony u CNC strojů (3D tisk i frézování) lze rozdělit dle typu na:

- Dvoufázový krokový motor (standardně označován 2F)
- Třífázový krokový motor (standardně označován 3F) [16]
- Krokový motor dvoufázový nebo třífázový s enkodérem (se zpětnovazebním řízením polohy) [17]
- Servomotor (synchronní, střídavý)

U běžně dostupných 3D tiskáren je ve většině případů použit dvoufázový krokový motor bez jakékoli zpětnovazební regulace. Lehká tisková hlava (print head) a tisková podložka (heated bed), v kombinaci s pohybovým mechanismem ve formě ozubeného řemene, nekladou vysoké nároky na pohon. Podstatnými parametry jsou pouze rychlost a zrychlení (umocněno

převodovým poměrem), které jsou dány spíše způsobem řízení a elektronikou než výkonem samotného krokového motoru. Nestabilní chod (daný podstatou krokování) je v případě běžných 3D tiskáren velmi eliminován pružností samotného ozubeného řemene, který z části utlumí i nechtěné vibrace vnášené do konstrukce (lze eliminovat tzv. mikrokrokováním).

Třífázové krokové motory v praxi vykazují na rozdíl od dvoufázových krokových motorů rovnoměrnější a stabilnější chod téměř bez rezonancí (při vhodném naladění), které negativně ovlivňují životnost ostří nástrojů při obrábění [17].

Synchronní servomotory jsou nejvyšší kategorií mezi pohony os obráběcích strojů. Používají se v aplikacích, kde je kladen velký důraz na přesnost, stabilitu, dynamiku a momentovou zatížitelnost (dáno přetížitelností pohonu) [12].

V této diplomové práci byla zvolena koncepce „horní gantry“, kde pohyb celého příčnicku v ose X (podélný „po stojanech“) bude realizován dvěma pohony. V této konstrukční fázi je nutné předejít případným komplikacím souvisejících s tzv. křížením os, které může vzniknout např. vlivem ztráty kroku, mechanickou poruchou atd. Tato situace může vést k poškození pohybové soustavy nebo „rozhození“ geometrie stroje. Riziko tohoto problému nebo jeho destruktivní následky lze eliminovat nastavením řídicího systému stroje, ale nejvhodnější způsob je částečná prevence ve formě volby pohonu se zpětnovazebním řízením polohy nebo použití přímého odměřování. Z těchto důvodů bude výběr omezen na krokový motor se zpětnou polohovou vazbou a synchronní střídavý servopohon, jejichž výhody a nevýhody jsou popsány v následující tabulkách (Tab. 14) [12,16,18].

Tab 14) Popis charakteristických vlastností krokových motorů se zpětnou vazbou a střídavých servomotorů [12,19,20]

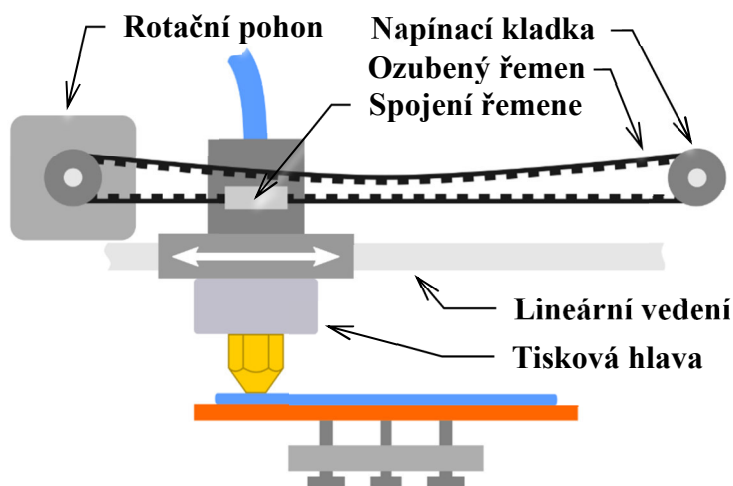
VLASTNOSTI KROKOVÝCH MOTORŮ SE ZPĚTNOU VAZBOU	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> Oproti krokovým motorům bez zpětné polohové vazby je zamezeno ztrátě kroků (Řízení reaguje na polohu odečtenou enkodérem a dorovnáva rozdílnou polohu mezi požadovanou a aktuální polohou) 	<ul style="list-style-type: none"> Princip krokování má tendenci vyvolávat vibrace a je více hlučný (Lze eliminovat na přijatelnou úroveň vhodným nastavením řídicího systému)
<ul style="list-style-type: none"> Jednodušší nastavení řídicího systému oproti aplikacím se servomotorem 	<ul style="list-style-type: none"> Omezená přetížitelnost oproti servomotorům
<ul style="list-style-type: none"> Široká nabídka a kompatibilita pohonů 	<ul style="list-style-type: none"> Klesající krouticí moment při zvyšujících se otáčkách
VLASTNOSTI SERVOMOTORŮ	
Výhody	Nevýhody
Vysoká přetížitelnost (po omezenou dobu)	Vyšší cena za pohon i jeho příslušenství
Vysoký moment v téměř celém spektru otáček	Složitější nastavení (vyšší cena za zprovoznění)
Možnost výběru pohonu s integrovanou brzdou	

Pro danou aplikaci by mohly být dle charakteristických vlastností použity obě varianty pohonů. Konkrétní volba pohonu bude založena na hodnotách vyplývajících z dimenzování pohonů a následné úvaze z hlediska zástavbových možností a ekonomické analýzy.

6.2.3 Volba pohybového mechanismu

Krouticí moment od rotačního pohonu je nutné převést na pohyb lineární a lze vybírat hned z několika možných variant řešení.

První variantou, která není u profesionálních CNC obráběcích strojů používána, ale vyskytuje se u běžně dostupných 3D tiskáren, je možnost pohonu pomocí ozubeného řemene (Obr. 11). Na hřídel motoru je nalisována nebo pomocí svěrného spoje připevněna ozubená řemenice. Řemen se nepoužívá uzavřený, ale ve většině případů se jedná o otevřený „rozpojený“ řemen, na jehož koncích jsou spony (Obr. 12), které jsou následně připojeny k tiskové hlavě. Pravá řemenice (kladka) je volnoběžná a slouží jako napínací.



Obr. 11) Mechanismus pro posun tiskové hlavy pomocí ozubeného řemene [21]



Obr. 12) Detail ozubeného řemene [22]

V případě 3D tiskáren se jedná o ideální řešení, protože převod ozubeným řemenem umožňuje tisk ve vysokých rychlostech. Běžné ztráty např. třením atd. jsou u tohoto provedení zanedbatelné. Nevýhod má toto řešení ale hned několik. I v případě použití kvalitního ozubeného řemene, jehož profil je vyztužen nejčastěji ocelovými vlákny, dochází při větších délkách a zatíženích k tzv. „propružení“. To lze částečně eliminovat dostatečnou silou napínání, které je vhodné vyřešit tak, aby bylo prováděno automaticky během životnosti řemene, nikoli manuálně při periodických servisních opravách. Napínání řemene také negativně ovlivňuje uložení hřídele pohonu, jehož ložiska jsou zatěžována při nedostatečném dimenzování nadměrnou radiální silou. Tento vliv lze řešit pomocí dalšího opěrného ložiska. Řemenový převod také klade menší nároky na přesnost a geometrii stroje, ale při CNC obrábění by byť malá pružnost řemene mohla mít vliv na přesnost obrábění a životnost nástrojů, proto je tato varianta vyloučena.

Další standardní variantou je pohon pomocí pastorku a ozubeného hřebene (Obr. 13). Tato varianta pohonu (ať už v použití přímého nebo šikmého ozubení) je vhodná pro delší posuvy, kde již např. kuličkový šroub bývá za hranici své vzpěrné tuhosti. Nevýhodou je vůle v ozubení, která má negativní vliv na přesnost polohování. Na obrázku (Obr. 14) je ukázáno řešení od společnosti Apex Dynamics Czech s.r.o., které je dle technické specifikace vhodné i pro přesné CNC obrábění. Krouticí moment z pohonu na pastorek je převáděn přes přesnou planetovou převodovku. Výrobce dosáhl požadovaného téměř „bezvúlového“ stavu úpravou ozubení pomocí technologie HeliTopo (spirálová geometrie zubů), která dle technického popisu výrobce maximalizuje styčné plochy profilů zubů [12,23,24,25,26].



Obr. 13) Základní varianta pohonu pomocí pastorku a ozubeného hřebene nabízená společností Apex Dynamics Czech s.r.o. [25]



Obr. 14) Řešení pohonu pomocí pastorku a ozubeného hřebene nabízené společností Apex Dynamics Czech s.r.o., kde je uplatněna technologie HeliTopo [26]

Vůle mezi zuby lze eliminovat několika způsoby [12]:

- Použití děleného pastorku (Obr. 15), kde je vymezení dáno pružinou od sebe odtlačovaných pastorků [27]
- Použití děleného (vzájemně posunutého) hřebene a společného pastorku
- Použití dvou pastorků, kde je vůle vymezena vzájemným pootočením pastorků o úhel [70]
- Metoda Master-Slave (viz Obr. 16), kde je vůle vymezena pomocí inteligentního řízení dvou pohonů pro každý pastorek zvlášť (princip „přetlačování“) [27]



Obr. 15) Použití děleného pastorku (výrobce Atlanta Drives Systems) [27]



Obr. 16) Metoda Master-Slave nabízená v této konstrukční podobě společností Atlanta Drives Systems [27]

Přestože lze negativní vlastnosti (vůle, hlučnost atd.) konstruktivně eliminovat, tak pro navrhovaný stroj je toto řešení především z hlediska vysoké ceny a velikosti zástavbového prostoru nevhodné a pohon bude řešen pomocí pohybového šroubu a matice.

Základní dělení pohybových šroubů a matic je dle typu závitu na trapézové a kuličkové. Trapézové šrouby se nejvíce vyskytují u starších obráběcích strojů, kde se z důvodu tzv. mrtvého chodu (vůle v posuvovém mechanismu) frézuje nesousledně, a sousledné frézování se používá pouze na dokončování při minimálních úběrech materiálu. U 3D tiskáren je běžně trapézový závit používán pro osy Z, kde je pohyb (rychlost) minimální a samosvornost závitu je zde naopak výhodou.

U obráběcích strojů dnešní produkce včetně menších modelářských frézek je nejčastěji použit kuličkový šroub. Kladné i záporné vlastnosti obou provedení jsou popsány v následující tabulce (Tab. 15).

Tab 15) Popis charakteristických vlastností trapézových a kuličkových šroubů [12, 28]

VLASTNOSTI TRAPÉZOVÝCH ŠROUBŮ	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> Levná varianta i v případě použití dvou matic pro vymezení vůle 	<ul style="list-style-type: none"> Vyšší tření (rychlejší opotřebování a riziko trhavého pohybu při přechodu ze statického na dynamické tření)
<ul style="list-style-type: none"> Jednodušší sestavení a menší nároky na pečlivost montážního dělníka 	<ul style="list-style-type: none"> Menší maximální rychlost polohování
<ul style="list-style-type: none"> Samosvornost (bezpečnější pro osy Z, aplikace zvedání břemen atd.) 	<ul style="list-style-type: none"> Značná vůle, která lze částečně vymežit, ale vzrůstá velikost tření
VLASTNOSTI KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> Účinnost a přesnost, která je dána valivými elementy a velikostí předpětí 	<ul style="list-style-type: none"> Nesamosvorný (např. u osy Z u CNC stroje nutnost použít pohon s brzdou)
<ul style="list-style-type: none"> Možnost vyšších rychlostí 	<ul style="list-style-type: none"> Cenově nákladnější varianta

Jelikož bude po navrhovaném stroji požadována dostatečná rychlost pro 3D tisk, kde v tomto režimu může stroj pracovat i několik desítek hodin, bylo rozhodnuto pro variantu s kuličkovým šroubem a maticí.

Hlavními parametry jsou průměr a velikost stoupání, od kterých se odvíjí vzpěrná tuhost (maximální dovolené otáčky z důvodu rozkmitání hřídele) a fyzikální vlastnosti převodu (síly a dynamiky) [12,30,31].

Dle technologie výroby jsou kuličkové šrouby děleny na [12,32]:

- Válcované kuličkové šrouby
- Okružované kuličkové šrouby
- Broušené kuličkové šrouby

Nejlevnější variantou jsou válcované kuličkové šrouby. Technologie výroby spočívá ve tváření profilu závitu, který je následně zakalen a v poslední fázi leštěn. Pomocí této technologie výrobci dosahují přesností [12,32,33]:

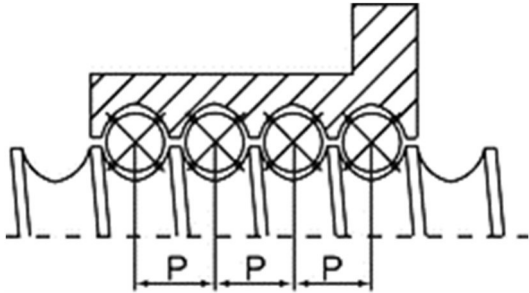
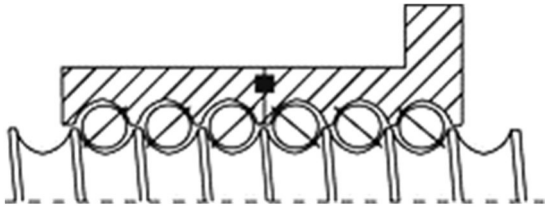
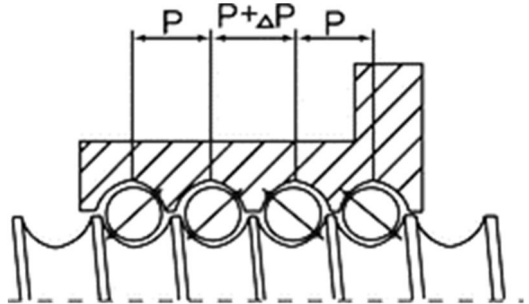

- IT7, kde maximální odchylka je 0,052 mm na 300 mm délky
- IT5 (pouze výběrem), kde maximální odchylka je 0,023 mm na 300 mm délky

Okružované kuličkové šrouby jsou obráběny nástroji s profilem závitu již do zakaleného povrchu materiálu. Touto metodou dosahuje většina vyrobených šroubů standardně přesností IT5 [32,33,34].

Nejvyšší kategorií jsou broušené kuličkové šrouby. Po předešlém obrobení a zakalení je broušení finální technologická operace, kterou lze dosáhnout přesností IT3 až IT1 (závislé na přesnosti brousícího stroje a kvalitě brusných nástrojů) [12,32,33].

Podobně jako u ozubeného převodu je i u kuličkového šroubu a matice několik způsobů, kterými lze vymežit nežádoucí vůli (Tab. 16).

Tab 16) Konstrukční varianty vymezení vůle [32, 35]

ZPŮSOBY VYMEZENÍ VŮLE KULIČKOVÉ ŠROUBU A MATICE		
Způsob provedení	Popis	Jednoduché schéma
Jednoduchá matice	Nejběžnější matice, u které lze velikost předpětí zvýšit vhodným výběrem kuliček.	
Dvojitá matice	Dvě matice spojené spojkou UNILOCK nabízené jako celek společností Steinmeyer. Zaručená vysoká tuhost a přesnost. Detail spojení a princip je chráněn patentem.	
Diference ve stoupání závitu	Předpětí dáno odchylkou od jmenovité hodnoty stoupání závitu, v tomto případě je změna uprostřed matice (některé verze mají změnu stoupání v prvním a posledním závitu matice, nebo také v celé její délce).	
Dvě matice vymezené pružinou	Předpětí je dáno tuhostí pružiny. Výhodou je téměř neměnná velikost předpětí během opotřebovávání. Nevýhodou může být snížená tuhost oproti verzi s vymezením pomocí broušené podložky nebo zde zmíněné spojky UNILOCK.	

Výběr konkrétního typu kuličkového šroubu a matice byl konzultován s technickým specialistou společnosti Power Belt, která je distributorem strojírenských prvků společnosti TBI MOTION. Při detailnějším prostudování produktového portfolia byla spatřena jako výhoda zaměnitelnost téměř všech produktů s produkty společnosti HIWIN. s.r.o. Jedná se především o stejné přípojovací rozměry jednotlivých prvků a stejné hodnoty a koeficienty sloužící pro dimenzování [33,36,71].

V následující tabulce (Tab. 17) je vyobrazeno cenové porovnání kuličkového šroubu o průměru 16 mm a stoupání 5 mm v délce jednoho metru v různých provedeních.

Tab 17) Cenová analýza kuličkových šroubů a matice [36]

CENOVÁ ANALÝTY KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ A MATICE				
Produkt	Označení	Přesnost / Předpětí	Cena (bez DPH) [EUR]	Výrobce / Dodavatel
Válcovaný kuličkový šroub	SCR 81.018.015	C7 (50 µm)	39,6 (1 m)	TBI MOTION / Power Belt
	SCR 81.012.015	C5 (18 µm)	47,53 (1 m)	
Broušený kuličkový šroub	SCRG 81.012.115	C3 (8 µm))	623,6 (1 m)	
Jednoduchá přírubová matice	OFU 81.079.015	P0, P1	85,46 (1 ks)	



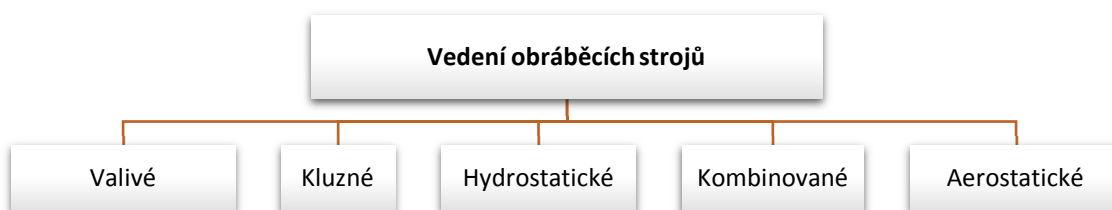
Cenová analýza potvrdila vliv technologie výroby na výslednou cenu produktu. Pro celkový přehled je do porovnání zahrnuta varianta broušeného kuličkového šroubu, která několikanásobně převyšuje cenu válcovaného šroubu. Ceny válcovaného kuličkového šroubu a matic od společnosti Hiwin (dle dodavatele CNCshop) jsou v podobné cenové relaci v porovnání s výrobcem TBI Motion (dle dodavatele Power Belt). Předběžná volba typu šroubu a jednoduché přírubové matice byla založena na prostudování katalogů, porovnání zástavbových rozměrů, hodnot tuhostí a statického i dynamického zatížení [33,36,37].

Výběr šroubu s označením SCR 81.012.015 je opodstatněn vyšší přesností C5. Za menší příplatek je tedy přesnost na délce 300 mm zvýšena z 0,05 mm na hodnotu menší než 0,02 mm.

Se společností Power Belt byla prokonzultována také možnost zvýšení předpětí matice typu OFU 81.079.015. Výrobce na základě bližší specifikace objednávky provede zvýšení předpětí pomocí vhodného výběru kuliček (napárování kuliček s konkrétním šroubem). Zde vybrané komponenty (šroub i matice) včetně uvedených rozměrů slouží pouze pro předběžný návrh, který bude v práci dále ověřen výpočtem.

6.2.4 Vedení obráběcích strojů

Vedení obráběcích strojů zajišťuje definovaný pohyb pohybujících se částí (nástroje, stolu atd.). Základní rozdělení je vyobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 17) [12].



Obr. 17) Varianty vedení obráběcích strojů (převzato z [12])

Výběr bude z důvodu finanční náročnosti omezen na valivá a kluzná vedení. U běžných 3D tiskáren, kde je velký tlak kladen na cenu, je u mnoha konstrukcí použito vedení ve formě jezdců složených z několika běžných kuličkových ložisek (nebo kladek), kde je předpětí nastavováno mechanicky při periodických servisních intervalech pomocí excentricky přenastavitelných kladek (Obr. 18). Toto vedení však není vhodné pro jakékoli obráběcí aplikace. Problémy s tuhostí a opotřebováváním jsou viditelné i u 3D tiskáren, kde je nepřesnost dráhy dána také křivostí vedení, které je nejčastěji řešeno běžnými hliníkovými profily [12,38].

Řešení kluzného lineárního vedení od společnosti PBC Linear je další variantou ke zvážení, které bylo konzultováno s dodavatelskou společností Power Belt (Obr. 19). Vodicí kolejnice i vozík jsou vyrobeny z hliníku. Dodávají se ve dvou provedeních dle velikosti předpětí. Další výhodou jsou díky své jednoduchosti velmi malé zástavbové rozměry, vysoká tepelná odolnost a použití u strojů, kde je kladen požadavek na čistotu (styčné plochy díky vhodnému povlakování není nutné mazat). Toto řešení pro CNC obráběcí stroj ale nelze shledat jako vhodné, protože hliníkové provedení kolejnic je oproti kaleným ocelovým kolejnicím méně tuhé, a i přes kvalitní povlakování je velikost tření a riziko rychlejšího opotřebení vyšší než u klasického valivého vedení. Z hlediska ceny není tato varianta výhodnější oproti valivému vedení (pro stejné velikosti zatížení) [12,39].



Obr. 18) Vedení pomocí 4 kladek, kde spodní kladky lze (předepnout) pomocí excentrického šroubu [38]



Obr. 19) Vedení nabízené společností PBC Linear s produktovým označením MR Mini-Rail [39]

Valivá vedení se dělí dle konstrukčních provedení vodících tyčí (vedení) na:

- Nepodepřené vodící tyče (Obr. 20)
- Podepřené vodící tyče (Obr. 21)
- Prizmatická vedení (Obr. 22)



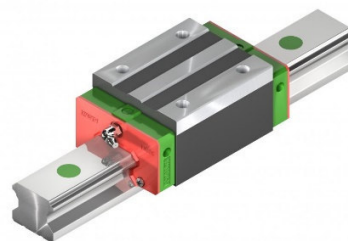
Obr. 20)

Nepodepřené vodící tyče
[40]



Obr. 21)

Podepřené lineární vedení
[41]



Obr. 22)

Prizmatické vedení
od společnosti HIWIN [42]

Nepodepřené vodící tyče jsou vhodné pouze pro malá zatížení a malé rozjezdy strojů. Oproti podepřnému lineárnímu vedení jsou jezdce (vozíky) uzavřené (výhoda v jednodušší ochraně před vniknutím nečistot).

Podepřené vodící tyče jsou mnohem přesnějším vedením vykazujícím vyšší tuhost. Horší vlastnosti oproti prizmatickému lineárnímu vedení jsou dány otevřenou konstrukcí jezdce, kde velmi záleží na celkové orientaci (natočení) vůči zátěžným silám. Mnohdy zdrojem menší únosnosti bývá základní přírubová lišta kolejnice, která je vyrobena u levnějších provedeníh z hliníku (kvalitnějším provedením je nerez) [43].

V této práci je na základě tohoto rozboru použito prizmatické lineární vedení. Dle technických specifikací má toto vedení největší zatížitelnost (ve všech směrech působících sil) a umožňuje dosáhnout vyšších rychlostí. Předběžně je použito lineární vedení s kuličkovými segmenty od společnosti TBI Motion (válečkové segmenty spíše pro velká zatížení) [43].

Z hlediska možné budoucí realizace je v případě snahy o snížení ceny možné zakoupit lineární prizmatické vedení neznačkové výroby. Případná náhrada za vedení od prověřeného výrobce je díky zaměnitelnosti poměrně jednoduchou záležitostí. Budoucí změna vedení na prizmatické (z nepodepřného nebo podepřného lineárního vedení) by znamenala mnohem větší konstrukční zásah, který by prvotní úsporu anuloval.

Lineární prizmatické vedení je dodáváno podobně jako u kuličkových šroubů v několika třídách přesností a předpětí. Lineární vedení o základní velikosti (šířce kolejnic 15 mm) lze standardně dodat v třídě přesnost „N“ ($\pm 0,1$ mm) nebo třídě přesnost „H“ ($\pm 0,03$ mm). Hodnoty předpětí pro tuto základní velikostní řadu jsou značeny „Z0“ (bez předpětí) a „Z1“ (mírné předpětí). Velikost předpětí a přesnosti je nutné zajistit u výrobce (dodavatele), který metodou výběru dosáhne požadovaných hodnot vhodnou kombinací komponent [42,43].

V případě realizace bude objednáno lineární vedení s přesností „H“ a velikosti předpětí „Z1“, kde je 1 ks vozíku v této konfiguraci (a výrobce TBI Motion) za cenu 37,3 EUR. Krytování, mazání, uložení kuličkových šroubů, hřídelové spojky a další periferie budou popsány dále v této diplomové práci při detailním popisu finální konstrukce [43].

6.3 Návrh posuvové soustavy v ose X

Po předešlé rešerši a konstrukční úvaze jsou vytypovány konkrétní prvky lineárního systému, jejichž vhodnost pro reálné použití je nutné ověřit výpočtem. Přestože byly navrženy a také v konstrukci budou dále použity prvky od společnosti TBI Motion, budou výpočty prováděny mimo jiné dle doporučených výpočtových kroků společností Hiwin [42]. Mimo výrobci doporučenými výpočtovými postupy je výpočtová zpráva vhodně doplňována doporučenou literaturou [11,12,44].

Konkrétní volba pohonů a ostatních komponent proběhla v několika iteracích. Z tohoto důvodu tato výpočtová zpráva pracuje s parametry konstrukčních komponent, které jsou součástí finální konstrukce.

6.3.1 Návrh posuvového mechanismu

Osa X je v navrhované konstrukci realizována pomocí dvou posuvových sestav (pro levý a pravý stojan dva samostatné pohony a kuličkové šrouby). Jedná se o základní pohybový mechanismus, který z konstrukčního hlediska nese osy Y a Z, jejichž hmotnost je nutné zvážit z hlediska statické i dynamické únosnosti soustavy. Díky dvěma pohonům, a tím pádem rozložení zatěžujících sil, bude výpočet proveden s určitými zjednodušeními. Při zjednodušeném pohledu na problematiku bude výpočet proveden pro jednu pohybovou soustavu (kuličkový šroub a matici). To znamená, že bude počítáno s celou hmotností pohybující se hmoty, jejíž pohyb bude pro výpočet proveden jedním kuličkovým šroubem a maticí.

Kuličkový šroub bude přes spojku přímo spojen s pohonem. Uložení kuličkového šroubu bude na začátku i na konci v ložiscích (ložiskových tělesech), které jsou přímo doporučeny výrobcem. Uložení kuličkového šroubu u motoru zamezuje axiálnímu a radiálnímu pohybu. Uložení na konci kuličkového šroubu je tzv. volné, které zachycuje pouze radiální zatížení (z důvodu tepelné roztažnosti). Vlastní konstrukce ložiskových těles by měla smysl v případě omezeného zástavbového prostoru, z hlediska finanční stránky (a v neposlední řadě možného servisu) bude snaha o použití standardních komponent [42].

6.3.2 Pohybový šroub

Dle předchozích kapitol byl pro předběžný výpočet vybrán válcovaný kuličkový šroub společnosti TBI Motion o velikosti 16 mm a stoupání 5 mm, který je číselně značen 81.012.015. Matice byla zvolena taktéž od společnosti TBI Motion, konkrétně typ OFU s číselným označením 81.079.015. Jejich parametry jsou zaneseny v tabulce (Tab. 18) [42,45].

Tab 18) Vlastnosti vybraných komponent [42,45]

VLASTNOSTI VYBRANÉHO KULIČKOVÉHO ŠROUBU			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Jmenovitý průměr šroubu	d	16	[mm]
Malý průměr šroubu	d _k	12,9	[mm]
Velikosti stoupání závitu	P	5	[mm]
Dynamická únosnost	C _{dyn}	13538	[N]
Statická únosnost	C ₀	29 940	[N]
Maximální otáčkový faktor	D _{nmax}	70 000	[–]

Výpočet kritických otáček

Kuličkové šrouby se nesmějí přibližovat ani pracovat v kritických otáčkách, proto jsou maximální dovolené otáčky omezeny na 80 % velikosti kritických otáček.

$$n_{kx} = k_d \cdot \frac{d_k}{l_{dx}^2} \cdot 10^8 = 1,875 \cdot \frac{12,9}{725,5^2} \cdot 10^8 = 4595,3 \frac{1}{\text{min}} \quad (19)$$

kde: $k_d [-]$ je koeficient uložení kuličkového šroubu [45]

$l_{dx} [\text{mm}]$ je vzdálenost mezi ložisky, vycházející z 3D modelu finálního konstrukčního návrhu [45]

Výpočet maximálních pracovních otáček

$$n_{maxx} = n_{kx} \cdot 0,8 = 4595,3 \cdot 0,8 = 3676,24 \frac{1}{\text{min}} \quad (20)$$

Výpočet otáček při rychloposuvu

$$n_{rx} = \frac{v_{rx} \cdot 10^3}{p} = \frac{12 \cdot 10^3}{5} = 2400 \frac{1}{\text{min}} \quad (21)$$

kde: $v_{rx} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$ je maximální hodnota rychlosti posuvu stanovená vstupními požadavky

$$\text{Podmínka: } n_{rx} < n_{maxx} \Rightarrow 2400 < 3676,24 \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (22)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti při statickém zatěžování

Z hlediska statického zatížení působí na šroub pouze reakční síly od obráběcích prací (v tomto směru pouze složky sil v horizontální rovině od frézování). Tato síla se teoreticky rozkládá mezi dva pohony. V praxi ale nelze považovat vedení obráběcího stroje (především u menších modelářských strojů) jako dokonale tuhé, přesné a předepnuté. Proto bude vzpěrná tuhost kontrolována na působení celé velikosti síly, kdy je tímto ošetřeno obrábění v krajních polohách (blízko jednoho z vedení).

Výpočet axiální síly působící při statickém zatěžování na šroub

$$F_{ksx} = F_{cf} = 157,9 \text{ N} \quad (23)$$

kde: $F_{ksx} [\text{N}]$ je statická axiální síla působící na šroub a $F_{cf} [\text{N}]$ řezná síla od frézování

Výpočet maximální teoretické dovolené axiální síly

$$F_{kx} = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_{kx}^2} \cdot 10^5 = 2,05 \cdot \frac{12,9^4}{650^2} \cdot 10^5 = 13\,436,5 \text{ N} \quad (24)$$

kde: $k_k [-]$ je koeficient závislý na typu zatížení (předepsáno výrobcem v katalogu)

$l_{kx} [\text{mm}]$ je nepodepřená délka kuličkového šroubu (vychází z konstrukčního návrhu)

Výpočet maximálních dovolené provozní axiální síly

$$F_{kxmax} = 0,5 \cdot F_{kx} = 0,5 \cdot 13\,436,5 = 6718,3 \text{ N} \quad (25)$$

$$\text{Podmínka: } F_{ksx} < F_{kxmax} \Rightarrow 157,9 < 6718,3 \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (26)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti při dynamickém zatěžování

Na rozdíl od statického zatěžování jsou zde zahrnuty síly vznikající od zrychlení (brždění) pohybujících se hmot.

Výpočet axiální síly působící při statickém zatěžování na šroub

$$F_{kdx} = m_{cx} \cdot \frac{v_{rx}}{60 \cdot t_{px}} = 40,5 \cdot \frac{12}{60 \cdot 0,1} = 81 \text{ N} \quad (27)$$

kde: m_{cx} [kg] je součet hmotností všech pohybujících se částí (včetně vřetena, nástroje, kabeláže, spojovacího materiálu atd.), jejichž změny z hlediska dynamiky (zrychlení a zpomalení) jsou pohlcovány zde na vzpěr kontrolovaným kuličkovým šroubem

t_{px} [s] značí dobu, během které dojde ke zrychlení z klidu na hodnotu v_{rx} nebo k brždění do klidového stavu z hodnoty v_{rx}

$$\text{Podmínka: } F_{kdx} < F_{kx\max} \Rightarrow 81 < 6718,3 \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (28)$$

Kontrola otáčkového faktoru pro nejvyšší velikost rychloposuvu

$$D_n = d \cdot n_{rx} = 16 \cdot 2400 = 38\,400 \quad (29)$$

$$\text{Podmínka: } D_n < D_{n\max} \Rightarrow 38\,400 < 70\,000 \Rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (30)$$

Kontrola životnosti

Životnost závisí na mnoha faktorech (čistota, mazání, pracovní teplota, pracovní zatížení atd.). Pro výpočet je nutné stanovit střední hodnotu zatížení a střední hodnotu otáček, které lze přesně definovat až na základě konkrétního využití stroje. U multifunkčního stroje je stanovení hodnot ještě obtížnější, a proto tyto hodnoty byly přibližně stanoveny.

Výpočet životnosti kuličkového šroubu v otáčkách

$$L_{ot} = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{13\,538}{500} \right)^3 \cdot 10^6 = 1,985 \cdot 10^{10} \text{ ot} \quad (31)$$

kde: F_m [N] je střední hodnota napětí, která byla odhadnuta s výraznou rezervou, protože je závislá na režimech zatěžování a mnoha dalších parametrech

Výpočet životnosti kuličkového šroubu v provozních hodinách

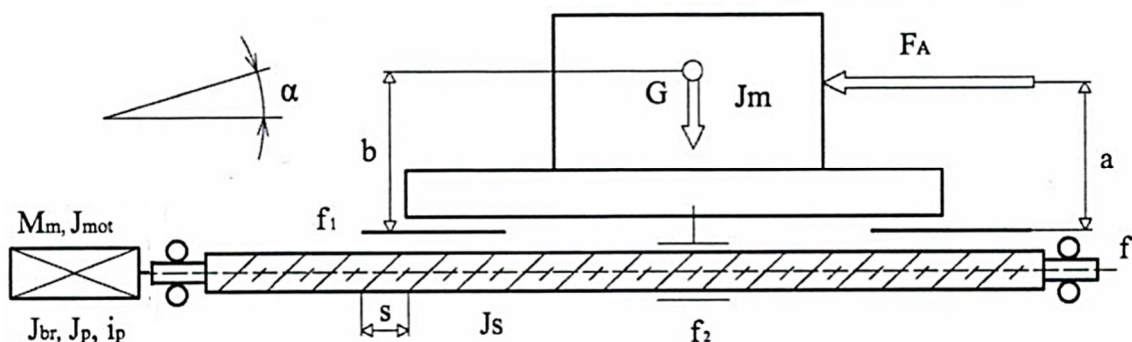
$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_m \cdot 60} = \left(\frac{13\,538}{500} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{2400 \cdot 60} = 137845 \text{ h} \quad (32)$$

kde: n_m [1/min] je střední hodnota otáček, která byla odhadnuta ze stejných důvodů jako hodnota F_m s výraznou rezervou

V této kapitole bylo provedeno ověření správného výběru kuličkového šroubu a matice pro použití v navrhovaném stroji. Zjednodušení (z důvodu použití dvou pohonů) byly provedeny pro nekritičtější situace, přičemž i přes tato zjednodušení lze prohlásit vybraný kuličkový šroub jako vyhovující s výraznou rezervou. Zvolení kuličkového šroubu o menším průměru je již nemožné, protože vybraná matice je nabízena až od velikosti průměru šroubu 16 mm.

6.3.3 Dimenzování pohonu

Na základě následujících výpočtů ze statického, kinematického i dynamického hlediska budou získány parametry, kterým by měl pohon pro danou aplikaci vyhovovat. Pro lepší názornost pohybové soustavy slouží schematický náčrt (Obr. 23). Vstupní parametry pro výpočet jsou zaneseny v tabulce (Tab. 19).



Obr. 23) Schematicky vyobrazena pohybová soustava [12]

Tab 19) Vstupní parametry pro dimenzování pohonu v ose X [12,42,45]

PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ POHONU V OSE X			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Účinnost valivého vedení	η_v	0,98	[–]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	$\eta_{K\check{s}}$	0,92	[–]
Účinnost uložení kuličkového šroubu	η_L	0,92	[–]
Součinitel tření ve vodících plochách	f_1	0,005	[–]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukováný na poloměr šroubu	f_2	0,003	[–]

Statické hledisko

Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_{K\check{s}} \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,83 \quad (33)$$

Výpočet potřebného momentu motoru z hlediska statiky

$$M_{Mx} = \frac{F_{ksx} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{157,9 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,83} = 0,151 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (34)$$

Kinematické hledisko

Výpočet lineárního zrychlení (zpomalení) příčnicku

$$a = \frac{v_{rx}}{60 \cdot t_{px}} = \frac{12}{60 \cdot 0,1} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (35)$$

Výpočet úhlového zrychlení kuličkového šroubu

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2}{0,005} = 2513,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (36)$$

Dynamické hledisko

Výpočet ztrátového momentu od třecích sil

$$M_{GT} = \frac{m_{cx} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi} = \frac{40,5 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} = 0,00158 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (37)$$

kde: $g [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ je gravitační zrychlení

$\alpha [^\circ]$ je úhel naklonění pohybové soustavy

Výpočet síly od předeptnutí kuličkového šroubu

$$F_P = 0,35 \cdot F_{ksx} = 0,35 \cdot 157,9 = 55,27 \text{ N} \quad (38)$$

Výpočet ztrátového momentu kuličkového šroubu

$$M_{KSM} = \frac{F_P \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \eta_{Kš}^2) + \frac{m_{cx} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot dk \cdot f_2}{2} = \frac{55,27 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{40,5 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos(0) \cdot 0,0129 \cdot 0,003}{2} = 0,0068 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (39)$$

Výpočet celkového momentu zátěže (redukovaný na hřídel motoru)

$$M_{zdrhm} = M_{GT} + M_{KSM} = 0,00158 + 0,0068 = 0,00838 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (40)$$

Výpočet momentu setrvačnosti posuvových hmot (redukovaný do osy šroubu)

$$J_M = m_{cx} \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 40,5 \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 2,565 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (41)$$

Výpočet celkového momentu setrvačnosti (redukovaný na hřídel motoru)

$$J_{rhm} = J_{Mot} + J_{Kš} + J_M + J_{sp} = 5,2 \cdot 10^{-5} + 3,63 \cdot 10^{-5} + 2,565 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-6} = 1,1895 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (42)$$

kde: $J_{Mot} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ je moment setrvačnosti motoru (hodnota odečtena z katalogu výrobce)

$J_{Kš} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ je moment setrvačnosti kuličkového šroubu (hodnota vypočtena v prostředí CAD programu)

$J_{sp} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ je moment setrvačnosti hřídelové spojky (hodnota vypočtena v prostředí CAD programu)

Výpočet potřebné velikosti momentu motoru z hlediska dynamiky

$$M_{MDx} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_s + M_{zdrhm} = 1,1895 \cdot 10^{-4} \cdot 2513,3 + 0,00838 = 0,307 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (43)$$

Kontrola poměru celkového momentu setrvačnosti (redukovaného na hřídel motoru) a momentu setrvačnosti motoru

Správný dynamický poměr se má pohybovat v intervalu od 1,5 do 3 [12].

$$\frac{J_{\text{rhm}}}{J_{\text{Mot}}} = \frac{1,1895 \cdot 10^{-4}}{5,2 \cdot 10^{-5}} = 2,288 \quad (44)$$

$1,5 < 2,288 < 3 \Rightarrow$ Vyhovuje

Aby nebylo nutné provádět výpočet v několika iteracích, bylo zde pracováno již s konkrétním pohonem, jehož výběr společně s výběrem pohonů v ostatních osách je shrnut v jedné společné kapitole.

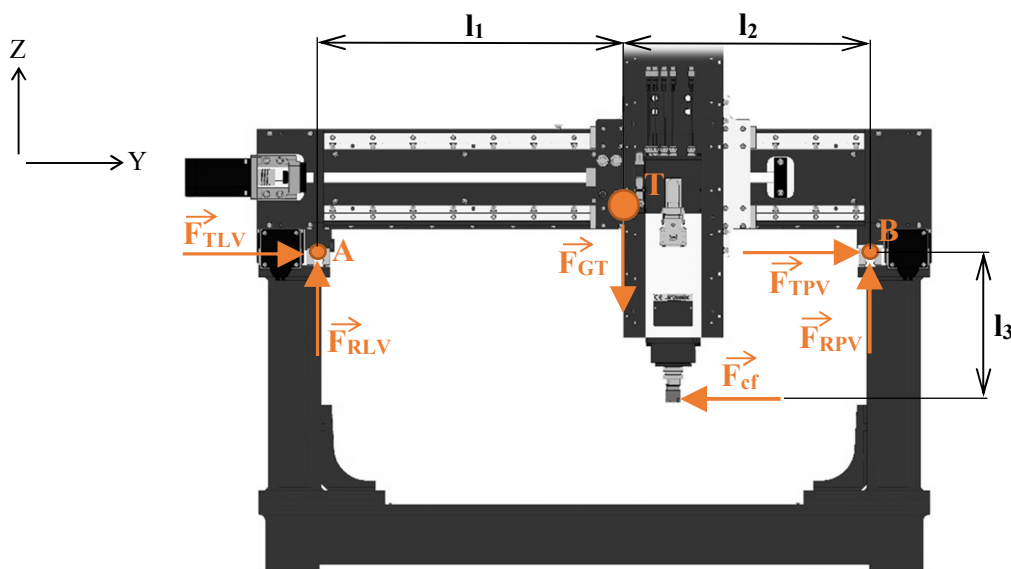
6.3.4 Dimenzování lineárního vedení

Tato výpočtová část slouží pro kontrolu předběžně vybraného lineárního vedení. Detailnější popis konstrukčních částí a jejich ustavení bude popsáno dále v práci při popisu celé konstrukce.

Lineární vedení (vozíky) mají výrobcem předepsanou hodnotu statické a dynamické únosnosti. Jelikož je v celé konstrukci použito lineární vedení stejného typu a velikosti, bude výsledná vhodnost vozíku posouzena pro nejzatíženější vozík v celé konstrukci. V rámci osy X bude výpočet proveden pro roviny YZ a XZ.

Výpočet lineárního vedení pro rovinu YZ (pravé a levé vedení)

Pro výpočet byla jako nejvhodnější (nejkritičtější) shledána pozice vřetena při frézování co nejvíce u pravého vedení a ve výšce stolu. Této poloze odpovídají číselné hodnoty rozměrů uvedené v tabulce (Tab. 20), které jsou zakótovány ve schematickém náčrtu (Obr. 24). Rozměry vychází z finálního konstrukčního návrhu.



Obr. 24) Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose X

Tab 20) Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení

PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ LINEÁRNÍHO VEDENÍ			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Hmotnost těles působících na vedení osy X	m_{cx}	40,5	[kg]
Řezná síla při frézování	F_{cf}	157,9	[N]
Délka (viz schéma Obr. 24)	l_1	528,5	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 24)	l_2	293,5	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 24)	l_3	350	[mm]

Výpočet tíhové síly působící v těžišti pohybujících se hmot

$$F_{GT} = m_{cx} \cdot g = 40,5 \cdot 9,81 = 397,3 \text{ N} \quad (45)$$

Statická rovnováha sil v ose Y

$$\sum F(y) = 0 \quad (46)$$

$$F_{TLV} + F_{TPV} - F_{cf} = 0$$

Tečná síla působící na pravé a levé vedení

Předpoklad je takový, že tečná síla působící na vedení (reakce od působení řezných sil) bude působit na pravé i levé vedení stejnou silou.

$$F_{TLV} = F_{TPV} = \frac{1}{2} \cdot F_{cf} = \frac{1}{2} \cdot 157,9 = 78,95 \text{ N} \quad (47)$$

Momentová rovnováha kolem osy X (vztažená k bodu A)

$$\sum M_A(x) = 0 \quad (48)$$

$$F_{GT} \cdot l_1 + F_{cf} \cdot l_3 = F_{RPV} \cdot (l_1 + l_2)$$

Radiální síla působící na pravé vedení

$$F_{RPV} = \frac{F_{GT} \cdot l_1 + F_{cf} \cdot l_3}{l_1 + l_2} = \frac{397,3 \cdot 528,5 + 157,9 \cdot 350}{528,5 + 293,5} = 322,77 \text{ N} \quad (49)$$

Statická rovnováha sil v ose Z

$$\sum F(z) = 0 \quad (50)$$

$$F_{RLV} + F_{RPV} - F_{GT} = 0$$

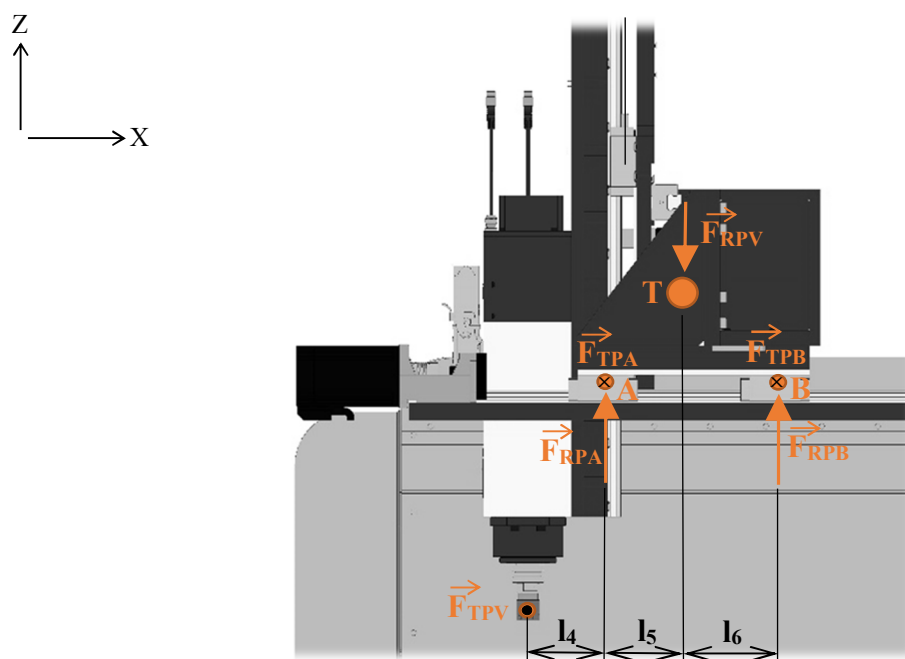
Radiální síla působící na levé vedení

$$F_{RLV} = F_{GT} - F_{RPV} = 397,3 - 322,77 = 74,53 \text{ N} \quad (51)$$

Výpočtem byl ověřen předpoklad, že při zadaných vstupních parametrech bude nejvíce zatěžované pravé vedení.

Výpočet lineárního vedení pro rovinu XZ (pravé vedení)

Následující výpočet slouží pro určení radiálních a tečných sil, které působí na přední a zadní vozík pravého vedení. Pro určení sil je vytvořen schematický náčrt (Obr. 25) doplněný tabulkou (Tab. 21). Pro lepší názornost je schematický náčrt zjednodušen. Přední vozík je označen písmenem „A“ a zadní vozík písmenem „B“. Reakční síly působící na přední a zadní vozík vychází z předchozího výpočtů pro rovinu YZ.



Obr. 25) Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose X

Tab 21) Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení

PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ LINEÁRNÍHO VEDENÍ			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Radiální síla (působící na pravé vedení)	F_{RPV}	322,77	[N]
Tečná síla (působící na pravé vedení)	F_{TPV}	78,95	[N]
Délka (viz schéma Obr. 25)	l_4	71	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 25)	l_5	46,9	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 25)	l_6	93,7	[mm]

Statická rovnováha sil v ose Y

$$\sum F(y) = 0$$

$$F_{TPV} - F_{TPA} - F_{TPB} = 0 \quad (52)$$

Statická rovnováha sil v ose Z

$$\sum F(z) = 0$$

$$F_{RPA} + F_{RPB} - F_{RPV} = 0 \quad (53)$$

Momentová rovnováha kolem osy Z (vztažená k bodu A)

$$\sum M_A(z) = 0$$

$$F_{TPB} \cdot (l_5 + l_6) + F_{TPV} \cdot l_4 = 0 \quad (54)$$

Momentová rovnováha kolem osy Y (vztažená k bodu A)

$$\sum M_A(y) = 0$$

$$F_{RPB} \cdot (l_5 + l_6) = F_{RPV} \cdot l_5 \quad (55)$$

Radiální síla působící na zadní vozík (s označením B)

$$F_{RPB} = \frac{F_{RPV} \cdot l_5}{l_5 + l_6} = \frac{322,77 \cdot 46,9}{46,9 + 93,7} = 107,67 \text{ N} \quad (56)$$

Radiální síla působící na přední vozík (s označením A)

$$F_{RPA} = F_{RPV} - F_{RPB} = 322,77 - 107,67 = 215,1 \text{ N} \quad (57)$$

Tečná síla působící na zadní vozík (s označením B)

$$F_{TPB} = -\frac{F_{TPV} \cdot l_4}{l_5 + l_6} = -\frac{78,95 \cdot 71}{46,9 + 93,7} = -39,87 \text{ N} \quad (58)$$

Tečná síla působící na přední vozík (s označením A)

$$F_{TPA} = F_{TPV} - F_{TPB} = 78,95 - (-39,87) = 118,82 \text{ N} \quad (59)$$

Tab 22) Souhrnná tabulka zatížení předního a zadního vozíku pravého vedení

ZATÍŽENÍ PŘEDNÍHO A ZADNÍHO VOZÍKU PRAVÉHO VEDENÍ			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Radiální síla působící na přední vozík (s označením A)	F_{RPA}	215,1	[N]
Tečná síla působící na přední vozík (s označením A)	F_{TPA}	118,82	[N]
Radiální síla působící na zadní vozík (s označením B)	F_{RPB}	107,67	[N]
Tečná síla působící na zadní vozík (s označením B)	F_{TPB}	-39,87	[N]

Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose X

Pro nejvíce zatížený vozík lze stanovit statické ekvivalentní zatížení. Pro osu X je dle souhrnné tabulky (Tab. 22) nejvíce zatěžován přední vozík na pravém vedení.

$$P_X = |F_{RPA}| + |F_{TPA}| = 215,1 + 118,82 = 333,9 \text{ N} \quad (60)$$

Výpočet trvanlivosti (ověření správného výběru typu a velikosti vozíku) bude proveden dále v práci pro nejvíce zatížený vozík v rámci celého stroje.

Na dalších stranách výpočtové zprávy bude posuzována posuvová soustava (kuličkový šroub i lineární vedení) v osách Y a Z. Princip výpočtu bude ve stejném sledu jako předešlé výpočtové kroky.

6.4 Návrh posuvové soustavy v ose Y

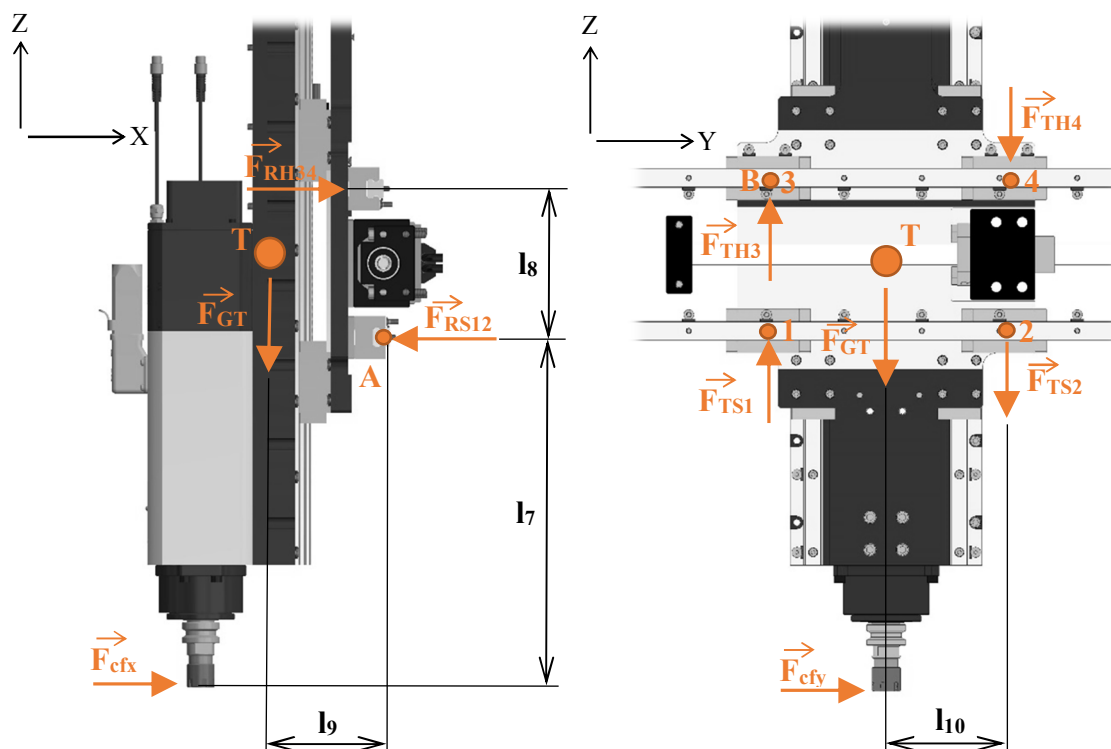
Posuvová soustava ose Y využívá stejné komponenty jako osa X. Pro osu Y není nutné realizovat výpočet kuličkového šroubu ze dvou důvodů:

- Výpočet kuličkové šroubu v ose X byl proveden pouze pro jeden pohon (v reálném provedení dva pohony), kde se i při tomto značném zjednodušení ukázaly komponenty jako značně předdimenzované.
- V ose Y bude pohybováno s menší hmotou (menší zatěžování kuličkového šroubu)

Z těchto důvodů bude výpočet osy Y proveden pouze se zaměřením na lineární vedení, kde nelze vyloučit vyšší zatížení díky vyššímu vyložení vřetena a zároveň menší osové vzdálenosti lineárního vedení.

6.4.1 Dimenzování lineárního vedení

Podobně jako u osy X je cílem výpočtu najít a následně ověřit nejvíce zatížený vozík. Na následujících schematických obrázcích (Obr. 26) je vyobrazeno silové působení na osu Y v rovině XZ (obrázek vlevo) a YZ (obrázek vpravo). Orientace reakčních sil působících na lineární vedení je volena dle předpokladu na základě směru působení řezných sil. Aby výpočet vedl k vhodnému dimenzování lineárního vedení, je složka řezné síly pro osu X a osu Y volena jako maximální řezná síla. Jako referenční poloha je brána pozice vřetena při frézování s největším vyložení (nejblíže rovině stolu). Tomuto stavu odpovídají číselné hodnoty parametrů uvedené tabulce (Tab. 23).



Obr. 26) Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose Y

Tab 23) Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení

PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ LINEÁRNÍHO VEDENÍ			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Hmotnost těles působících na vedení osy Y	m_{cy}	16	[kg]
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = F_{cfx} = F_{cfy}$	157,9	[N]
Délka (viz schéma Obr. 26)	l_7	378	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 26)	l_8	118	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 26)	l_9	104	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 26)	l_{10}	91	[mm]

Výpočet tíhové síly působící v těžišti pohybujících se hmot

$$F_{GT} = m_{cy} \cdot g = 16 \cdot 9,81 = 157 \text{ N} \quad (61)$$

Statická rovnováha sil v ose X (pro pohled v rovině XZ)

$$\sum F(x) = 0 \quad (62)$$

$$F_{cfx} + F_{RH34} = F_{RS12}$$

Statická rovnováha sil v ose Z (pro pohled v rovině YZ)

$$\sum F(z) = 0 \quad (63)$$

$$F_{TS1} + F_{TH3} = F_{TS2} + F_{TH4} + F_{GT}$$

Momentová rovnováha kolem osy Y (vztažená k bodu A v rovině XZ)

$$\sum M_A(y) = 0 \quad (64)$$

$$F_{GT} \cdot l_9 + F_{cfx} \cdot l_7 = F_{RH34} \cdot l_8$$

Momentová rovnováha kolem osy X (vztažená k bodu B v rovině YZ)

$$\sum M_B(x) = 0 \quad (65)$$

$$F_{cfy} \cdot (l_7 + l_8) = F_{GT} \cdot l_{10} + F_{TH4} \cdot (2 \cdot l_{10}) + F_{TS2} \cdot (2 \cdot l_{10})$$

V rovině YZ je velikost tečné síly působící na dva vozíky pod sebou stejná (reakci tečné síly zachycují dva vozíky uspořádané pod sebou stejnou silou):

$$F_{TH4} = F_{TS2}; F_{TH3} = F_{TS1} \quad (66)$$

Radiální síla působící na horní lineární vedení

$$F_{RH34} = \frac{F_{GT} \cdot l_9 + F_{cfx} \cdot l_7}{l_8} = \frac{157 \cdot 104 + 157,9 \cdot 378}{118} = 644,2 \text{ N} \quad (67)$$

Pro jeden vozík z horní řady tedy platí: $F_{RH3} = F_{RH4} = \frac{F_{RH34}}{2} = 322,1 \text{ N}$

Radiální síla působící na spodní lineární vedení

$$F_{RS12} = F_{cfx} + F_{RH34} = 157,9 + 644,2 = 802,1 \text{ N}$$

Pro jeden vozík ze spodní řady tedy platí: $F_{RS1} = F_{RS2} = \frac{F_{RS12}}{2} = 401,1 \text{ N}$ (68)

Tečná síla působící na vozíky 2 a 4

$$F_{TH4} + F_{TS2} = \frac{F_{cfy} \cdot (l_7 + l_8) - F_{GT} \cdot l_{10}}{2 \cdot l_{10}} = \frac{157,9 \cdot (378 + 118) - 157 \cdot 91}{2 \cdot 91} =$$
$$= 351,8 \text{ N} \Rightarrow F_{TS2} = F_{TH4} = \frac{351,8}{2} = 175,9 \text{ N} \quad (69)$$

Tečná síla působící na vozíky 1 a 3

$$F_{TS1} + F_{TH3} = F_{TS2} + F_{TH4} + F_{GT} = 175,9 + 175,9 + 157 = 508,8 \text{ N}$$
$$\Rightarrow F_{TS1} = F_{TH3} = \frac{508,8}{2} = 254,4 \text{ N} \quad (70)$$

Tab 24) Souhrnná tabulka zatížení vozíků lineárního vedení osy Y

ZATÍŽENÍ VOZÍKŮ LINEÁRNÍHO VEDENÍ OSY Y			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Radiální síla působící na vozík 1 a 2	$F_{RS1} = F_{RS2}$	401,1	[N]
Radiální síla působící na vozík 3 a 4	$F_{RH3} = F_{RH4}$	322,1	[N]
Tečná síla působící na vozík 1 a 3	$F_{TS1} = F_{TH3}$	254,4	[N]
Tečná síla působící na vozík 2 a 4	$F_{TS2} = F_{TH4}$	175,9	[N]

Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose Y

$$P_Y = |F_{RS1}| + |F_{TS1}| = 401,1 + 254,4 = 655,5 \text{ N} \quad (71)$$

6.5 Návrh posuvové soustavy v ose Z

Konstrukce osy Z je řešena s pomocí stejných komponent jako osy X a Y. Rozdíl bude v pohonu, který musí být vybaven brzdou (z důvodu nesamosvornosti kuličkového šroubu).

6.5.1 Dimenzování pohonu

Tab 25) Vstupní parametry pro dimenzování pohonu v ose Z

PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ POHONU V OSE Z			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Účinnost valivého vedení	η_V	0,98	[–]
Účinnost kuličkového šroubu a matice	$\eta_{K\check{S}}$	0,92	[–]
Účinnost uložení kuličkového šroubu	η_L	0,92	[–]
Součinitel tření ve vodících plochách	f_1	0,005	[–]
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	f_2	0,003	[–]

Statické hledisko

Výpočet celkové účinnosti

$$\eta_C = \eta_V \cdot \eta_{K\dot{s}} \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,83 \quad (72)$$

Výpočet statické axiální síly působící na kuličkový šroub

$$F_{ksz} = m_{cz} \cdot g = 12,75 \cdot 9,81 = 125,1 \text{ N} \quad (73)$$

kde: m_{cz} [kg] je hmotnost pohybující se částí konstrukce v ose Z

Výpočet potřebného momentu motoru z hlediska statiky

$$M_{Mz} = \frac{F_{ksz} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta_C} = \frac{125,1 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,83} = 0,12 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (74)$$

Kinematické hledisko

Výpočet lineárního zrychlení (zpomalení) příčnicku

$$a = \frac{v_{rz}}{60 \cdot t_{px}} = \frac{10}{60 \cdot 0,1} = 1,67 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (75)$$

Výpočet úhlového zrychlení kuličkového šroubu

$$\varepsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,67}{0,005} = 2098,6 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (76)$$

Dynamické hledisko

Výpočet ztrátového momentu od třecích sil

$$M_{GT} = \frac{m_{cz} \cdot g \cdot f_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot P}{2 \cdot \pi} = \frac{12,75 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \sin(90) \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} = 0,000497 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (77)$$

kde: α [°] je úhel naklonění pohybové soustavy

Výpočet síly od předeprnutí kuličkového šroubu

$$F_P = 0,35 \cdot F_{ksz} = 0,35 \cdot 125,1 = 43,785 \text{ N} \quad (78)$$

Výpočet ztrátového momentu kuličkového šroubu

$$M_{KSM} = \frac{F_P \cdot P}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \eta_{K\dot{s}}^2) = \frac{43,785 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - 0,92^2) = 0,00535 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (79)$$

Výpočet celkového momentu zátěže (redukovaný na hřídel motoru)

$$M_{zdrhm} = M_{GT} + M_{KSM} = 0,000497 + 0,00535 = 0,0059 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (80)$$

Výpočet momentu setrvačnosti posuvových hmot (redukovaný do osy šroubu)

$$J_M = m_{cz} \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 12,75 \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 8,07 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (81)$$

Výpočet celkového momentu setrvačnosti (redukovaný na hřídel motoru)

$$J_{rhm} = J_{Mot} + J_{Kš} + J_M + J_{sp} = 5 \cdot 10^{-5} + 3,63 \cdot 10^{-5} + 2,565 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-6} = 1,1695 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (82)$$

kde: $J_{Mot} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ je moment setrvačnosti motoru (hodnota odečtena z katalogu výrobce)

Ostatní velikosti momentů setrvačnosti jednotlivých součástí se shodují s hodnotami součástí pro osu X (použity stejné komponenty). Moment setrvačnosti motoru je odlišný z důvodu použití pohonu vybaveného brzdou.

Výpočet potřebné velikosti momentu motoru z hlediska dynamiky

$$M_{MDz} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_S + M_{zdrhm} = 1,1695 \cdot 10^{-4} \cdot 2098,6 + 0,0059 = 0,251 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (83)$$

Kontrola poměru celkového momentu setrvačnosti (redukovaného na hřídel motoru) a momentu setrvačnosti motoru

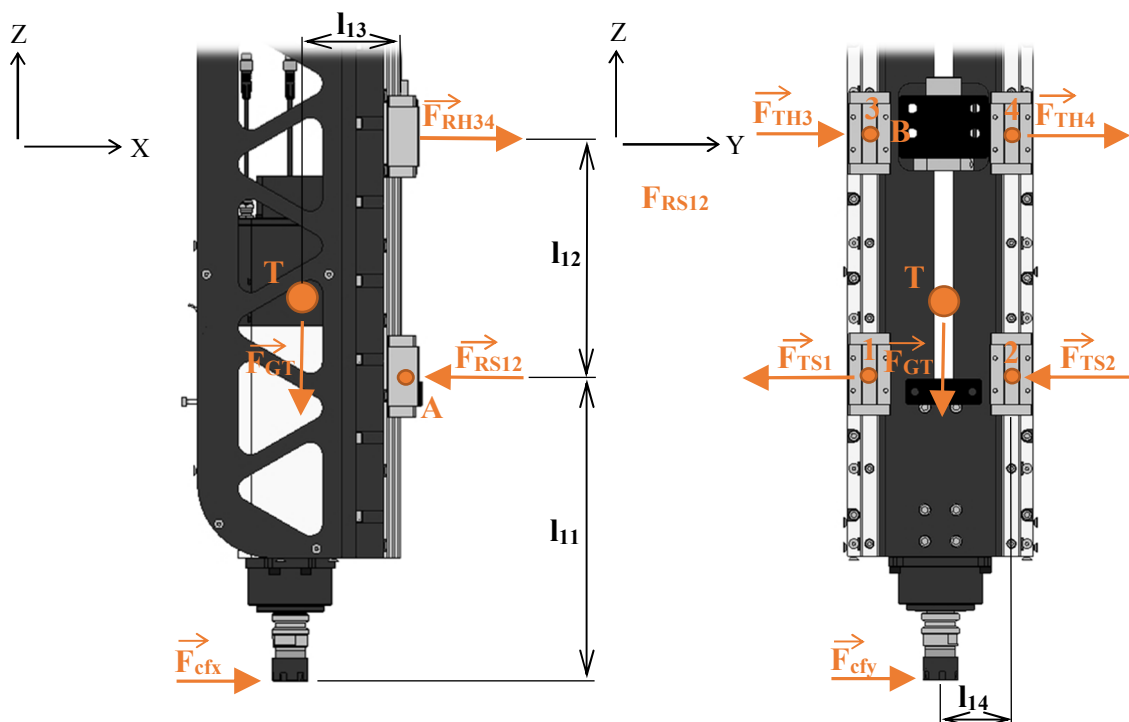
$$\frac{J_{rhm}}{J_{Mot}} = \frac{1,1695 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-5}} = 2,339 \quad (84)$$

$$1,5 < 2,339 < 3 \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Bylo zde pracováno již s konkrétním pohonem, jehož výběr společně s výběrem pohonů v ostatních osách je shrnut v jedné společné kapitole.

6.5.2 Dimenzování lineárního vedení

Při kontrole osy Y se ukázalo, že jednotlivé vozíky součástí lineárního vedení osy Y jsou více namáhané než vozíky na ose X. Z tohoto důvodu je vhodné provést výpočet také pro osu Z, kde značné vyložení vřetena má nemalý vliv na výsledné zatížení jednotlivých vozíků. Proto i zde bude simulována situace frézování s největším vyložением vřetena (viz Obr. 27 a Tab. 26)



Obr. 27) Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose Z

Tab 26) Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení

PARAMETRY PRO DIMENZOVÁNÍ LINEÁRNÍHO VEDENÍ			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Hmotnost těles působících na vedení osy Z	m_{cz}	12,75	[kg]
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = F_{cfx} = F_{cfy}$	157,9	[N]
Délka (viz schéma Obr. 27)	l_{11}	373	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 27)	l_{12}	192	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 27)	l_{13}	49	[mm]
Délka (viz schéma Obr. 27)	l_{14}	56,5	[mm]

Výpočet tíhové síly působící v těžišti pohybujících se hmot

$$F_{GT} = F_{ksz} = 125,1 \text{ N} \quad (85)$$

Statická rovnováha sil v ose X (pro pohled v rovině XZ)

$$\sum F(x) = 0$$

$$F_{cfx} + F_{RH34} = F_{RS12} \quad (86)$$

Statická rovnováha sil v ose Y (pro pohled v rovině YZ)

$$\sum F(y) = 0$$

$$F_{TS1} + F_{TS2} = F_{TH3} + F_{TH4} + F_{cfy} \quad (87)$$

Momentová rovnováha kolem osy Y (vztažená k bodu A v rovině XZ)

$$\sum M_A(y) = 0$$

$$F_{GT} \cdot l_{13} + F_{cfx} \cdot l_{11} = F_{RH34} \cdot l_{12} \quad (88)$$

Momentová rovnováha kolem osy Z (vztažená k bodu B v rovině YZ)

$$\sum M_B(x) = 0$$

$$F_{TS1} \cdot l_{12} + F_{TS2} \cdot l_{12} + F_{GT} \cdot l_{14} = F_{cfy} \cdot (l_{11} + l_{12}) \quad (89)$$

V rovině YZ je velikost tečné síly působící na dva vozíky orientovaných vedle sebe stejná (reakci tečné síly zachycují dva vozíky uspořádané vedle sebe v horizontální rovině stejnou silou):

$$F_{TH3} = F_{TH4}; F_{TS1} = F_{TS2} \quad (90)$$

Radiální síla působící na horní lineární vedení

$$F_{RH34} = \frac{F_{GT} \cdot l_{13} + F_{cfx} \cdot l_{11}}{l_{12}} = \frac{125,1 \cdot 49 + 157,9 \cdot 373}{192} = 338,7 \text{ N} \quad (91)$$

Pro jeden vozík z horní řady tedy platí: $F_{RH3} = F_{RH4} = \frac{F_{RH34}}{2} = 169,3 \text{ N}$

Radiální síla působící na spodní lineární vedení

$$F_{RS12} = F_{cfx} + F_{RH34} = 157,9 + 338,7 = 496,6 \text{ N}$$

Pro jeden vozík ze spodní řady tedy platí: $F_{RS1} = F_{RS2} = \frac{F_{RS12}}{2} = 248,3 \text{ N}$ (92)

Tečná síla působící na spodní vozíky 1 a 2

$$F_{TS1} + F_{TS2} = \frac{F_{cfy} \cdot (l_{11} + l_{12}) - F_{GT} \cdot l_{14}}{2 \cdot l_{12}} = \frac{157,9 \cdot (373 + 192) - 125,1 \cdot 56,5}{2 \cdot 192} =$$

$$= 213,9 \text{ N} \Rightarrow F_{TS1} = F_{TS2} = \frac{213,9}{2} = 107 \text{ N}$$
 (93)

Tečná síla působící na horní vozíky 3 a 4

$$F_{TH3} + F_{TH4} = F_{TS1} + F_{TS2} - F_{cfy} = 107 + 107 - 157,9 = 56,1 \text{ N}$$

$$\Rightarrow F_{TH3} = F_{TH4} = \frac{56,1}{2} = 28,1 \text{ N}$$
 (94)

Tab 27) Souhrnná tabulka zatížení vozíků lineárního vedení osy Z

ZATÍŽENÍ VOZÍKŮ LINEÁRNÍHO VEDENÍ OSY Z			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Radiální síla působící na vozík 1 a 2	$F_{RS1} = F_{RS2}$	248,3	[N]
Radiální síla působící na vozík 3 a 4	$F_{RH3} = F_{RH4}$	169,3	[N]
Tečná síla působící na vozík 1 a 2	$F_{TS1} = F_{TS2}$	107	[N]
Tečná síla působící na vozík 3 a 4	$F_{TH3} = F_{TH4}$	28,1	[N]

Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose Z

$$P_Z = |F_{RS1}| + |F_{TS1}| = 248,3 + 107 = 355,3 \text{ N}$$
 (95)

Tímto výpočtem byla dokončena analýza jednotlivých os. Získané výsledky budou na dalších stranách této práce použity jako vstupní parametry pro posouzení vhodnosti předběžného výběru jednotlivých komponent.

6.6 Shrnutí výsledků a finální volba lineárního vedení a pohonů pro osy X, Y, Z

Jednotlivé výpočty byly provedeny pro předběžně vybrané komponenty. Všechny výpočty probíhaly v několika iteracích, protože výsledky jsou velmi ovlivňovány konstrukčním návrhem, který se průběžně měnil a vylepšoval.

6.6.1 Kontrola vhodnosti výběru komponent lineárního vedení

Výpočet lineárního vedení byl realizován pro všechny osy navrhovaného stroje X, Y a Z. Pro nejvíce zatížený vozík (pro každou osu) bylo vypočítáno statické ekvivalentní zatížení, jejichž hodnoty jsou vyobrazeny následující tabulce (Tab. 28).

Tab 28) Souhrnná tabulka vypočtených statických ekvivalentních zatížení

STATICKÁ EKVIVALENTNÍ ZATÍŽENÍ V JEDNOTLIVÝCH OSÁCH			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose X	P_X	333,9	[N]
Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose Y	P_Y	655,5	[N]
Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose Z	P_Z	355,3	[N]

Z výsledků je patrné, že nejvíce zatěžovaný vozík je součástí osy Y. Tento výsledek byl předpokládán, protože osa Y má nejmenší osovou vzdálenost lineárního vedení a při největším vyložení vřetena vzniká velký moment, který vozíky lineárního vedení musí zachytit.

V následující tabulce (Tab. 29) jsou vypsány pro výpočet potřebné parametry vybraného lineárního vedení a vozíku. Výrobce lineárního vedení je společnost TBI Motion. Vybraný vozík nese označení TRH15VL. Konkrétní volba vozíku lineárního vedení byla konzultována s dodavatelskou společností PowerBelt, která ho pro danou aplikaci dle jejich zkušeností doporučuje [71].

Tab 29) Parametry lineárního vedení a vozíku s označením TRH15VL [46]

PARAMETRY VYBRANÉHO LINEÁRNÍHO VEDENÍ (VOZÍKU)			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Statická únosnost vozíku	C_0	25740	[N]
Dynamická únosnost vozíku	C	13430	[N]

Statický bezpečnostní faktor

$$f = \frac{C_0}{P_Y} = \frac{25740}{655,5} = 39,27 \quad (96)$$

kde: f [–] je statický bezpečnostní faktor, u kterého výrobce TBI Motion doporučuje pracovat s minimální hodnotou $f = 2,5$ [–] [46]

Trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v délkové jednotce

$$L_v = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot C}{f_W \cdot P_Y} \right)^3 \cdot 50000 = \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 13430}{1,2 \cdot 655,5} \right)^3 \cdot 50000 = 248849181,2 \text{ m} \quad (97)$$

kde: f_H [–] je faktor tvrdosti (pro standardní oběžné dráhy je faktor tvrdosti roven jedné)

f_T [–] je faktor teploty (pro běžné prostředí je faktor teploty roven jedné)

f_W [–] je faktor zatížení (pro posuvové rychlosti menší než $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je faktor zatížení roven jedné)

Trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v časové jednotce

$$L_{vh} = L_v \cdot \frac{100000}{v_f \cdot 60} = 248849181,2 \cdot \frac{100000}{1096,2 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 3,784 \cdot 10^{11} \text{ h} \quad (98)$$

kde: v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] je posuvová rychlost, s kterou bylo počítáno při návrhu vřetena

Z hlediska statického zatěžování a vypočítané trvanlivosti lze prohlásit vybranou lineární sestavu jako vhodnou. Statický bezpečnostní faktor i hodnoty trvanlivosti by vyhovovaly i v případě použití miniaturního vedení, který však není z hlediska nezajímavé ceny brán v úvahu.

U reálného stroje je však nutné zmínit, že trvanlivost bude výrazně nižší. Velmi záleží na přesnosti ustavení, tuhosti stroje a s ní související vibrace přenášené do lineárního vedení, provozní teplotě, kvalitě mazání, čistotě prostředí a dalších faktorech.

6.6.2 Volba pohonů pro osy X, Y, Z

Výpočet pohonu byl proveden pro osy X a Z. Pro osu Y nebylo nutné provést výpočet, protože výpočet v ose X byl proveden pouze pro jeden pohon, a tudíž při použití stejného motoru i pro osu Y budou splněny všechny požadavky. Navíc použití stejného motoru od stejného výrobce (typu i velikosti) přináší výhodu v zaměnitelnosti, kdy lze v případě poruchy snadněji odlišit problémy mechanické (pohon) od elektronických (řízení). Také pro pečlivého provozovatele stroje je ekonomicky výhodnější mít ve skladu jeden náhradní motor, který v případě poruchy může nahradit pohon hned ve dvou osách.

Shrnutí požadavků na pohon pro osy X a Y

Výsledky výpočtů pro osu X (i pro Y) jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 30).

Tab 30) Výstupní parametry pro volbu pohonu v ose X (Y)

VÝSTUPNÍ PARAMETRY PRO VOLBU POHONU V OSE X (Y)			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Minimální moment motoru z hlediska statiky osy X (Y)	M_{Mx}	0,151	[N · m]
Minimální moment motoru z hlediska dynamiky osy X (Y)	M_{Mx}	0,307	[N · m]

Ačkoli v této práci proběhlo porovnání krokových motorů se servomotory, pro danou aplikaci se ukázalo jako vhodné použití obou typů pohonů. Finální výběr proto bude založen na porovnání konkrétních parametrů u konkrétních pohonů:

- Třífázový krokový motor se zpětnovazebním řízením polohy od výrobce Leadshine s označením ES-M32320 [47]
- AC servopohon od výrobce Panasonic s označením MSMD012J1S [48]

Zásadní parametry vybraných pohonů jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 31).

Tab 31) Parametry relevantních pohonů [47,48]

PARAMETRY RELEVANTNÍCH POHONŮ			
Parametr (popis)	Leadshine ES-M32320	Panasonic MSMD012J1S	Jednotky
Jmenovitý krouticí moment	2	0,32	[N · m]
Maximální pracovní otáčky	2400	3000	[min ⁻¹]
Jmenovitý výkon	–	100	[W]
Maximální krátkodobý moment	–	0,95	[N · m]
Cena za samotný pohon	2603	7074	[Kč]
Cena za driver ES-D508/ MBDJT2207	2413	8512	[Kč]
Přibližná cena za zdroj napájení, konektory, kabely a další příslušenství	4000	7000	[Kč]
Výsledná cena za sestavu jednoho pohonu pro jednu osu	9016	22586	[Kč]

Výše vypsané ceny (dle dodavatelů CNC Shop a Power Belt) je nutné brát pouze orientačně, protože periferie pohonů lze vybírat ze široké škály výrobců (různé kvality). Zde však bylo dbáno na přímo doporučené příslušenství od výrobců pohonů, čímž je sníženo riziko, že by daná sestava neumožňovala spolehlivé vzájemné fungování. Než bude rozhodnuto pro pohon v ose X a Y, je vhodné uvést parametry pro volbu pohonu v ose Z [47,48].

Shrnutí požadavků na pohon pro osu Z

Pohon v ose Z musí být vybaven z důvodu nesamosvornosti kuličkového šroubu brzdou, tudíž nelze použít identické pohony (bez brzdy), které se nabízí pro aplikaci v osách X a Y.

Tab 32) Výstupní parametry pro volbu pohonu v ose Z

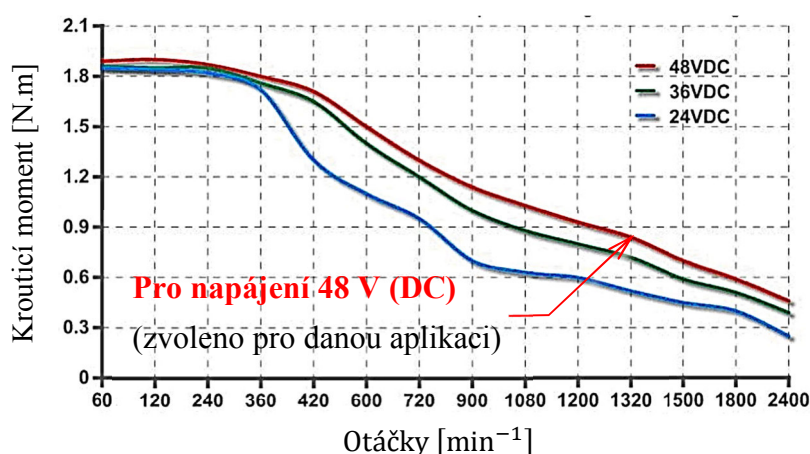
VÝSTUPNÍ PARAMETRY PRO VOLBU POHONU V OSE Z			
Parametr (popis)	Značka	Hodnota	Jednotky
Minimální moment motoru z hlediska statiky osy Z	M_{Mz}	0,12	[N · m]
Minimální moment motoru z hlediska dynamiky osy Z	M_{Mz}	0,25	[N · m]

Hodnoty požadovaných momentů v ose Z (viz Tab. 32) se výrazně neliší od momentů v ose X a Y (viz Tab. 30). Výše zmíněné relevantní pohony se vyrábějí i ve variantě s brzdou.

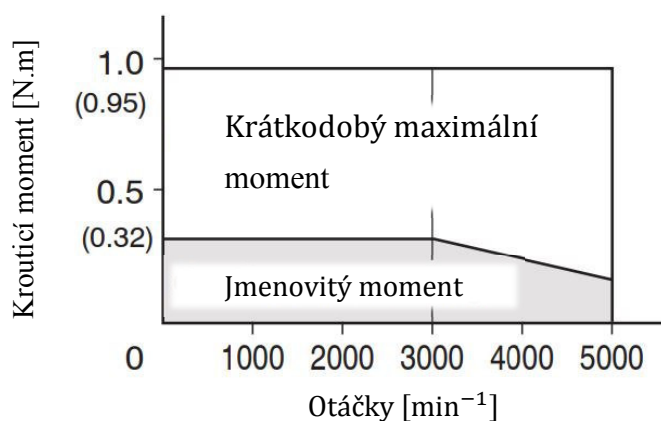
Příplatek za pohon vybavený brzdou je v rámci celkové ceny za kompletní sestavu nevýrazný, a proto tato skutečnost nemá žádný vliv na finální výběr pohonů.

Finální volba pohonů

Pro výsledné porovnání pohonů slouží následující dva grafy popisující závislost krouticích momentů na otáčkách. První graf (Obr. 28) popisuje charakteristiku krokového motoru Leadshine ES-M32320 (pohon s brzdou má obdobnou charakteristiku) a druhý graf (Obr. 29) popisuje charakteristiku servomotoru Panasonic MSMD012J1S [47,48].



Obr. 28) Pro přehlednost vizuálně upravené zobrazení průběhu krouticího momentu v závislosti na otáčkách pohonu Leadshine ES-M32320 [47]



Obr. 29) Pro přehlednost vizuálně upravené zobrazení průběhu krouticího momentu v závislosti na otáčkách pohonu Panasonic MSMD012J1S [48]

Ve finální konstrukci budou použity tyto pohony:

- v ose X a Y třífázový krokový motor Leadshine ES-M32320 [47]
- v ose Z dvoufázový krokový motor Leadshine CS-M22323B (s brzdou) [49]

Oproti servomotoru se jedná o značný kompromis, který však vyvažuje výsledná cena (viz Tab. 31). V případě neznalosti problematiky servomotorů je pro nezasvěcené uživatele velmi náročné stroj zprovoznit a práce externího technika výslednou cenu ještě značně navyšuje. Případná budoucí montáž servopohonů je konstrukčně realizovatelná, protože servomotor má stejnou velikost příruby jako vybrané krokové motory.

6.7 Návrh konstrukčních variant řešení rámu stroje

Po rešeršní a výpočetní části bylo nutné zvážit, jaké konstrukční řešení rámu stroje zvolit. V úvahu se nabízí mnoho možných řešení nebo jejich kombinace, a nelze pomocí jednoduché úvahy rozhodnout, která varianta je ta správná pro danou aplikaci.

Největší konstrukční celek, a to rám stroje, je předmětem této kapitoly. U něj není kladen důraz na hmotnost, ale spíše na tuhost, jednoduchost výroby a výslednou cenu.

Rozhodování bude o to komplikovanější, protože autor této práce uvažuje nad výrobou tohoto stroje a má pouze omezené možnosti výroby pomocí vlastní techniky. Proto výsledná volba varianty bude možná více subjektivní, ale o to více bude zvýšená pravděpodobnost, že dojde k následné realizaci.

6.7.1 První varianta v podobě montované konstrukce rámu stroje

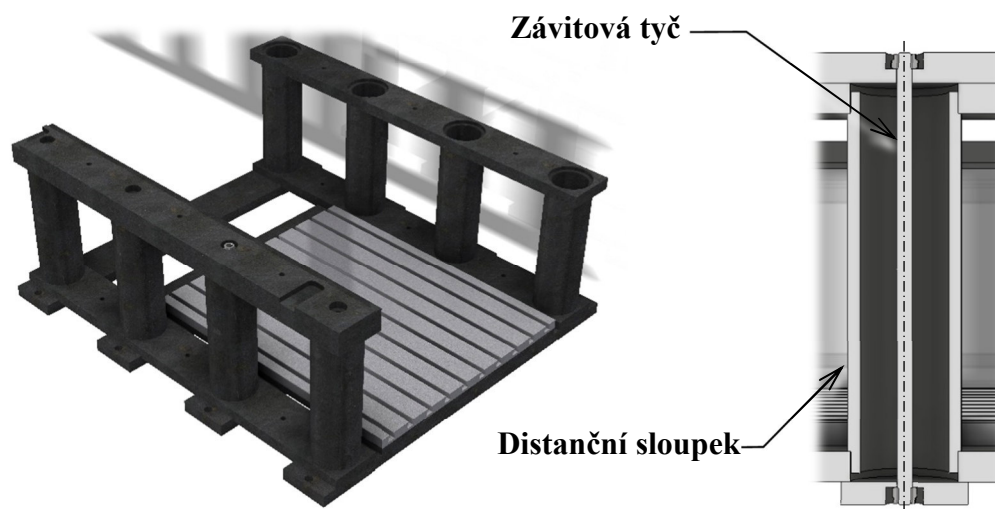
První varianta se nabízí montovaná konstrukce, která je zjednodušeně vyobrazena na obrázku (Obr. 30). Výrobu by bylo umožněno realizovat na konvenčních obráběcích strojích, ke kterým má autor přístup. Při trochu detailnější úvaze byla zpracována varianta s použitím distančních sloupků. Sloupek ve formě trubky, který by byl na obou koncích osoustružen na lícovaný průměr, by byl následně nalisován do horní a spodní desky. Tažné síly ve vertikálním směru by byly zachycovány závitovou tyčí pomocí předepjatého spoje.

Spojení obou stojanů by bylo řešeno pomocí několika desek obdélníkového průřezu. Rovnoběžnost stojanů (a především lineárních vedení) by bylo nutné zajistit při montáži, která je popisována v katalogích výrobců lineárních vedení.

Nevýhod je hned několik:

- Vysoká náročnost na přesnost výroby (soustružení na požadovanou délku) a montáže
- Výsledná tuhost závislá na preciznosti výroby
- Při řešení spojení obou stojanů pouze pomocí plochých desek by bylo nutné vhodně dimenzovat jejich průřezy pro dosažení požadované tuhosti a výsledná geometrie by byla z části ovlivněna kvalitou ustavení celého rámu na pracovní stůl (spodní rám stroje)

I přesto tato varianta bude zvažována, protože se jedná z určitého hlediska o jednodušší řešení oproti svařovanému provedení.



Obr. 30) Schematické vyobrazení montované konstrukce rámu stroje

6.7.2 Druhá varianta v podobě svařované konstrukce rámu stroje

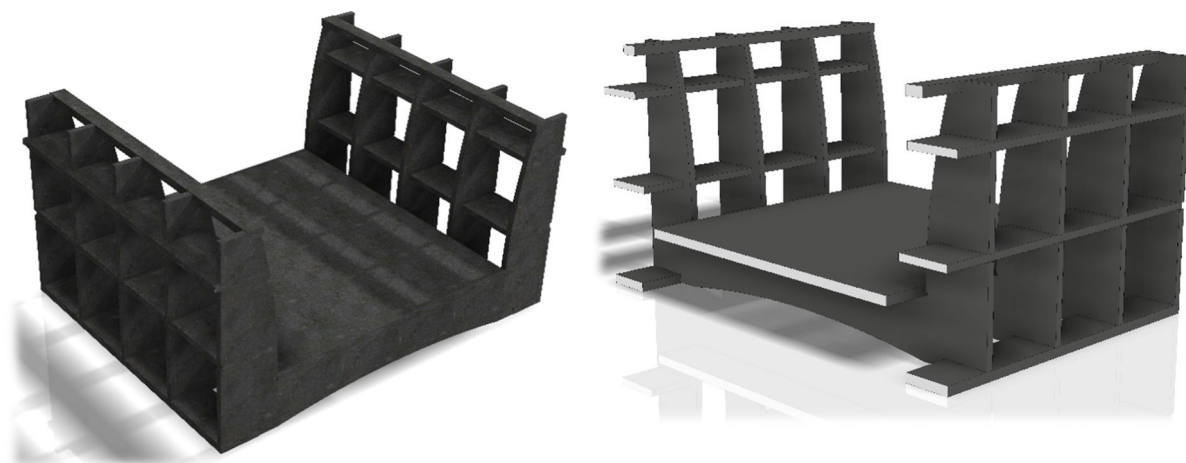
Další možná konstrukční varianta může být realizována jako jeden celistvý svařenec (Obr. 31). Jednotlivé desky (výpalky) by byly opatřeny tzv. zámky, které umožňují rychlé a relativně přesné sestavení, po kterém následuje systematické svařování. Systematickým svařováním se myslí technologický postup, při kterém svářeč eliminuje riziko zkroucení konstrukce.

Po svaření by musel být svařenec vyžihán ke snížení pnutí. Dříve se tento krok řešil přirozeným vystárnutím (často ve venkovním prostředí), ale aplikovat tento postup dnes není z hlediska časové náročnosti a nejistoty dosažení chtěného výsledku rozumné.

Po vyžihání konstrukce následuje obrobení plochy stolu, ploch pro montáž lineárního vedení, případně ploch referenčních hran a v neposlední řadě ploch pod ložiskové domky (včetně závitových děr). Svařenec musí být precizně v obráběcím stroji upnut, aby nebyl upnut již při deformaci, která by se opět po vyjmutí konstrukce ze stroje negativně projevila na výsledné geometrii rámu.

Z pohledu finanční náročnosti je nutné se zaměřit na jednotlivé etapy výroby. Vypálení přesných dílců dle dodaného CAD formátu je relativně finančně rozumná záležitost. Větší problém především pro běžné modeláře a kutily lze vidět v nutnosti vyžihání takto „velké“ konstrukce a následného obrobení na větší frézce. Tyto činnosti budou při výrobě pouze jednoho kusu navrhovaného stroje finančně náročnější (včetně logistiky).

Měření finálních ploch po obrobení by bylo možné (pro danou kategorii stroje) provést přímo na obráběcím stroji. Jedním z nejdůležitějších parametrů je rovinnost ploch pro ustavení lineárního vedení, která by se měla dle výrobců pohybovat při dané velikosti lineárního vedení maximálně do 0,02 mm (závisí také na třídě předepnutí) [42].



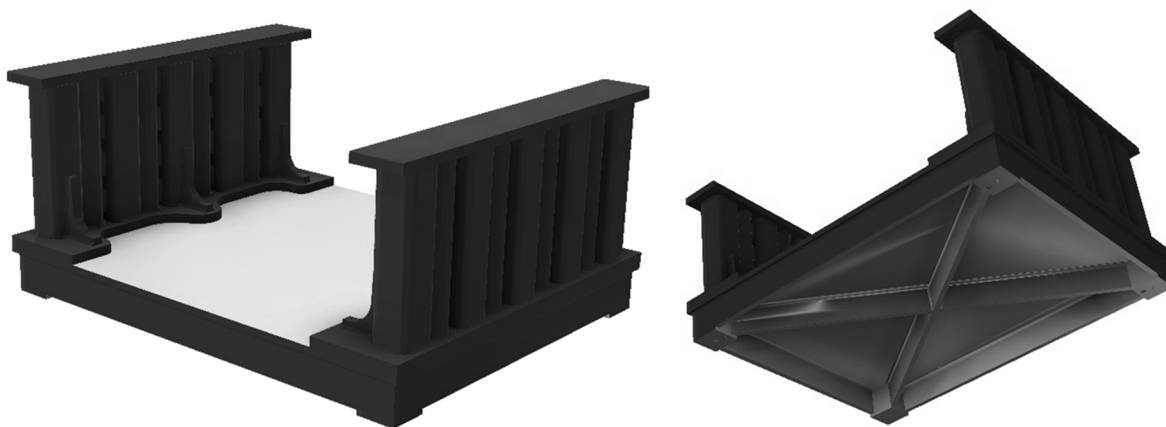
Obr. 31) Schematické vyobrazení svařované konstrukce rámu stroje

6.7.3 Třetí varianta v podobě kombinace litinového stolu a svařovaných stojanů

Základem celé konstrukce je litinová průměrná deska. Tato deska je vyráběna v několika rozměrech a třídách přesnosti (podobně jako je tomu tak u měřidel). Výhodou je široká nabídka na inzertních portálech, kde lze zakoupit průměrnou desku za zlomek ceny nové. U nákupu „z druhé ruky“ je ale riziko, že deska může být poškozena tzv. mikrotrhlinami, jejichž následek se projeví až při zamýšleném provozu (vibrace atd.). Také je nutné zabývat se přesností desky (rovinností), které je dosahováno broušením (popř. lapováním) nebo zaškrabáváním.

Stojany by byly vyrobeny jako dva samostatné svařence, pro které by platil podobný výrobní postup jako pro svařovanou konstrukci v předešlé kapitole.

Toto řešení (viz Obr. 32) má bezesporou výhodu v jistotě, že základna, od které se vše odvíjí, má přesnost výrazně převyšující požadavky dané aplikace, a při vhodné konstrukci zbývajících částí stroje lze dosáhnout velmi dobré přesnosti. Jelikož je stůl vyztužen žebrováním, lze konstrukci považovat za dostatečně tuhou pro navrhovaný stroj.



Obr. 32) Schematické vyobrazení kombinované konstrukce rámu stroje

6.7.4 Kritéria multikriteriální analýzy

Pro vyhodnocení všech tří variant byla zvolena metoda rozhodování dle kritérií, kde každé kritérium má svoji váhu (1-10). Posléze bude každá konstrukční varianta dle těchto nastavených kritérií hodnocena bodováním (1-10 body), kde hodnota 10 bodů znamená nejlepší hodnocení. Po komplexním obodování všech konstrukčních variant dle všech kritérií je proveden výpočet, kde konstrukční varianta s nejvyšším bodovým hodnocením bude shledána jako varianta nejlepší a nejvýhodnější pro danou aplikaci.

Hodnocení bude probíhat dle následujících kritérií:

- Časová náročnost výroby (odhadovaný čas obrábění včetně vedlejších časů, případné žíhání atd.)
- Jistota docílení požadované přesnosti (jako referenční je brána hodnota 0,02 mm pro rovinnost lineárního vedení, jedná se pouze o odhad, kde skutečnost je závislá na mnoha faktorech)
- Náročnost na logistiku (náročnost z hlediska převozu konstrukčních částí na svaření, žíhání, nutnost převozu do firmy z důvodu větších rozměrů obrobku atd.)
- Předpokládaná finanční náročnost (za celou konstrukci v požadované přesnosti)

6.7.5 Vyhodnocení kritérií multikritériální analýzy

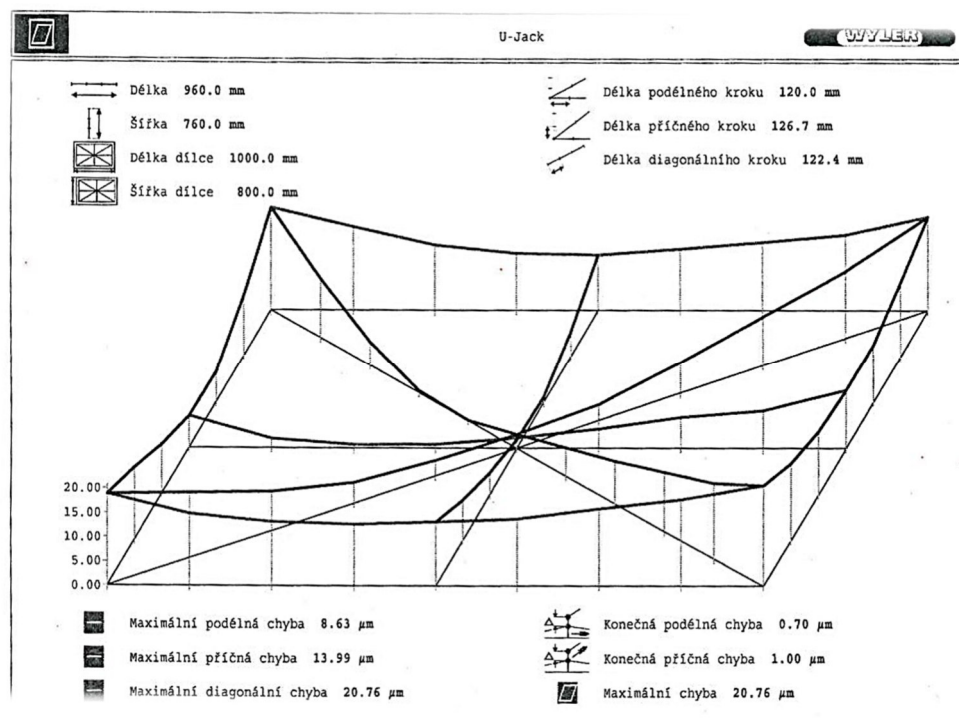
V následující tabulce (Tab. 33) je provedeno bodování jednotlivých konstrukčních variant a následný součet bodů každé z nich.

Tab 33) Zhodnocení kritérií

VYHODNOCENÍ DLE MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZY				
Hodnoticí kritérium	Váha hodnocení	První varianta	Druhá varianta	Třetí varianta
Časová náročnost výroby	5	5	6	6
Jistota docílení požadované přesnosti	10	4	5	7
Náročnost na logistiku	4	9	2	7
Předpokládaná finanční náročnost	7	5	6	5
Celkové hodnocení	-	136	130	163

Dle celkového hodnocení vychází třetí varianta jako nejlepší. Jedná se o variantu s průměrnou litinovou deskou a svařovanými stojany. Zde je nutné podotknout, že v případě zavádění sériové výroby (větší tlak na snížení výrobní ceny za kus atd.) by bylo nutné provést důkladnější analýzu jednotlivých variant dle aktuálních kritérií.

Na základě volby této varianty byla nabídka nových průměrných desek konzultována se společností KMITEX s.r.o., konkrétně s její pobočkou, která se zabývá měřením i kalibrací nástrojů a měřidel. Konkrétní typ s označením 1042.3 a rozměru 1000×800 mm je dodáván v třídě přesnosti 1 (rovinnost do 0,02 mm). Autorovi této práce byl poskytnut protokol z měření (Obr. 33), který reprezentuje standardní stav dodávaných průměrných litinových desek [50,51].



Obr. 33) Protokol z měření průměrné desky 1042.3 od společnosti KMITEX [51]

6.8 Konstrukční návrh zvolené varianty s doporučením pro realizaci

Po předešlé rešeršní části, uvážení všech výhod a nevýhod, výpočtů a multikriteriálních analýz lze přejít k finálnímu konstrukčnímu návrhu.

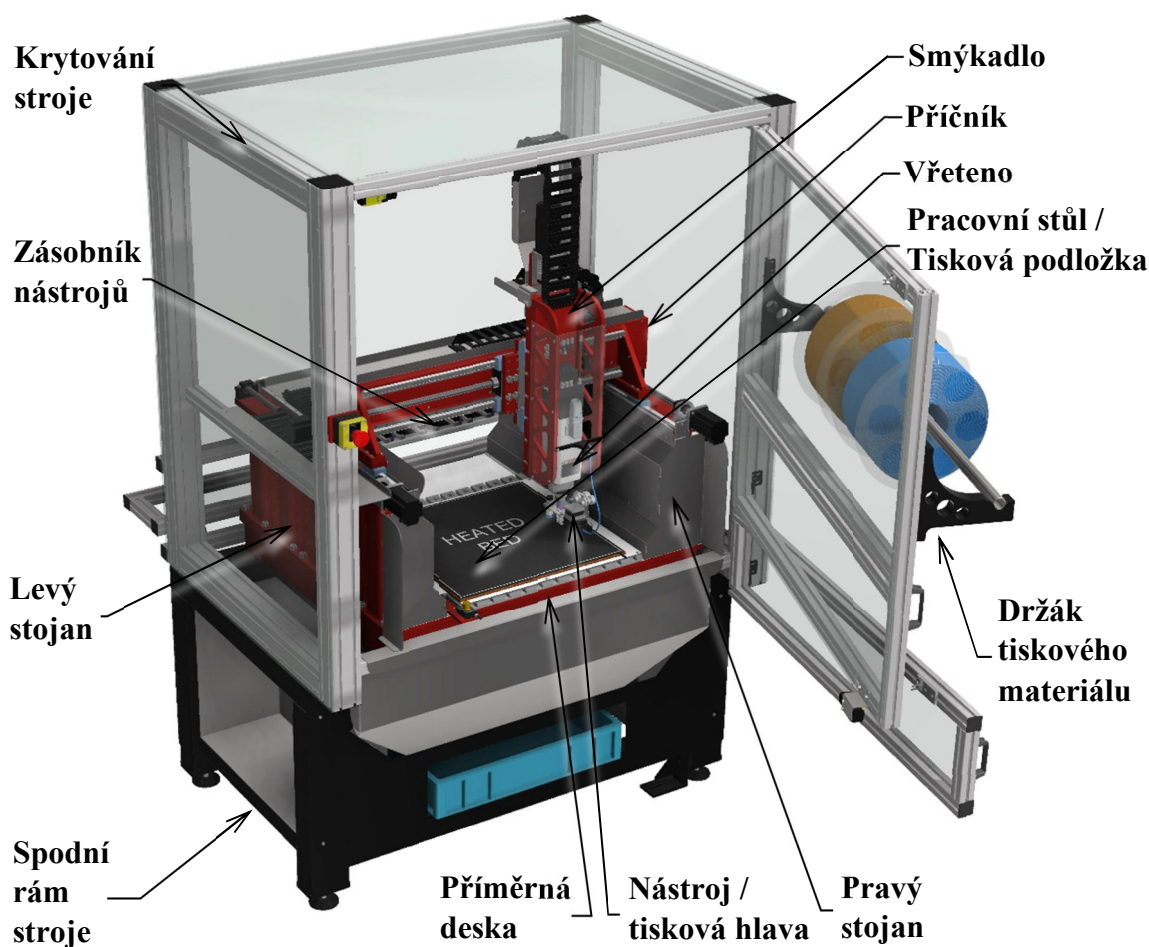
Konstrukční návrh byl vytvářen v několika iteracích v úzkém spojení s výpočtovou zprávou. Následující podkapitoly budou zaměřeny na detailní popis konstrukce všech periférií nově konstruovaného stroje.

6.8.1 Detailní konstrukční návrh a popis periférií

Stroj jako celek (viz Obr. 34) se skládá z několika periférií. Tím je umožněno stroj demontovat na jednotlivé menší celky. Tím je splněna podmínka průchodu stroje dveřmi o šířce 900 mm.

Základním prvkem je svařovaný ocelový stůl. Na něj je přimontována příměrná litinová deska, na níž je ustaven pracovní stůl a oba dva stojany (pravý a levý). Po stojanech se pohybuje příčník (v ose X). Příčník tvoří nosný prvek pro pohyb saní (v ose Y). Na saních je umístěno smýkadlo, které umožňuje pohyb vřetena v ose Z.

Součástí stroje je zásobník nástrojů umožňující jejich automatickou výměnu. Pro 3D tisk byla konstrukčně upravena tisková hlava, která je upínána do vřetena a tisková podložka, která je upínána na pracovní stůl. V neposlední řadě je stroj doplněn o krytování, které kromě uživatelsky přívětivých funkcí podporuje bezpečnost stroje. Vše je podrobněji popsáno v následující části této práce.



Obr. 34) Konstrukční návrh a popis jednotlivých periférií

6.8.2 Spodní rám stroje

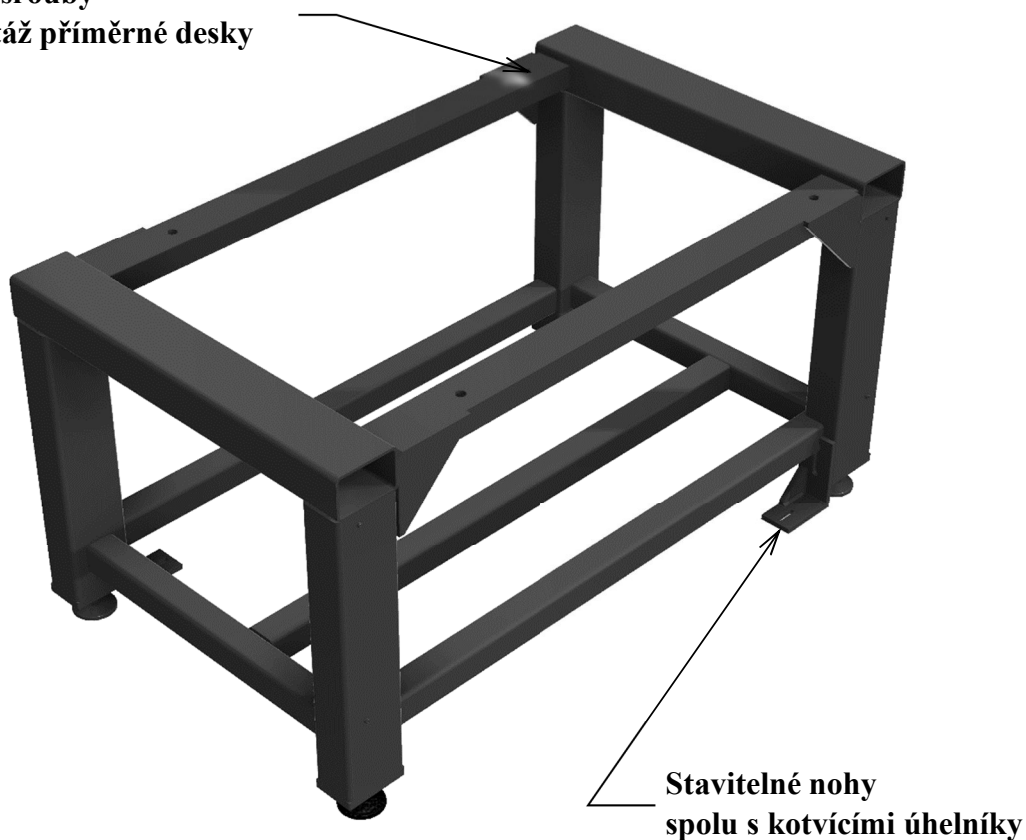
Spodní rám stroje (viz Obr. 35) je vyroben jako svařenec převážně z dutých ocelových profilů. Horizontální prvek je řešen ocelovým nosníkem ve tvaru „U“, který je na jeho koncích vyztužen výpalky trojúhelníkového tvaru. V tomto nosníku jsou vyhotoveny čtyři díry pro šrouby. Ze spodní strany příměrné desky je tedy nutné vyhotovit díry se závitem. Nicméně spojení pomocí šroubů zespodu má výhodu v možnosti montáže již osazeného obráběcího stroje jako celku, aniž by bylo nutné provést demontáž stojanů pro přístup k hlavám šroubů.

Jelikož je stroj relativně malý a konstruovaný pro modelářské účely, lze předpokládat jeho umístění a provozování v blízkosti života jiných lidí. Proto je nutné co nejvíce eliminovat vibrace, které by mohly být přenášeny ze stroje přes rám až do podlahy. Z tohoto důvodu bylo uvažováno nad tlumením vibrací pomocí tlumící elastické desky od výrobce Gumex. Gumová deska nese označení Elaston Eltec FS 700, která je svými vlastnostmi doporučována pro uložení obráběcích strojů z důvodu útlumu vibrací. Deska je dodávána za příznivou cenu ve formátu 2000×1000 mm, proto lze tuto investici považovat jako výhodnou (zejména při uvažování výroby více strojů) [52].

Spodní prostor mezi podlahou a rámem umožňuje transport a naložení stroje pomocí standardního paletového vozíku. Ustavení stroje je možné pomocí čtyř stavitelných nohou. Dvě nohy (přes uhlopříčku) jsou doplněny kotvícími úhelníky, které slouží k pevnému spojení konstrukce s podlahou například za použití chemické kotvy.

Krytování včetně třískového hospodářství a prostorů pro osazení všech periférií (elektrické a pneumatické zapojení) bude popsáno dále v práci.

**Díry pro šrouby
pro montáž příměrné desky**



Obr. 35) Svařovaná konstrukce spodního rámu

6.8.3 Pravý a levý stojan (lože osy X)

Stojany jsou řešeny jako ocelové svařence (Obr.36). Jednotlivé polotovary jsou voleny z materiálu S355J2 (1.0577 nebo dle značení ČSN 11 503), u kterého je zaručena dobrá svařitelnost. Základní ocelová deska (která bude ve styku s průměrnou deskou) bude vypálena laserovým nebo vodním paprskem. Vodní paprsek je upřednostňován z důvodu vnášení menšího množství tepla (zamezení možnému zkroucení). Horní ocelovou desku lze koupit jako hutní polotovary v podobě tyče obdélníkového průřezu.

Samotné „distanční“ sloupy jsou řešeny formou několika dutých čtvercových profilů. Jak je z obrázku (Obr. 36) patrné, dva sousední profily jsou proti sobě pootočené (o úhel 45°). Je tomu tak z důvodu uvolnění prostoru pro šrouby ve spodní desce, které slouží ke spojení stojanů s průměrnou deskou. Takto volené uspořádání profilů má také kladný vliv na pevnost stojanu jako celku, protože pootočením profilů (dle kvadratického momentu průřezu) dojde ke zpevnění stojanů i při zatíženích působících v jiném než (na plochu kolmém) směru.

Konstrukce a dimenzování probíhala v několika iteracích, během kterých byla konstrukce průběžně prověřována metodou konečných prvků. Cílem bylo získat tuhou konstrukci, která bude odolná proti vibracím při uvažovaných provozních podmínkách

Oproti variantě z ocelových výpalků je obtížnější správné sestavení pro následné svaření. Při výrobě více kusů by bylo vhodné vytvořit jednoduchý přípravek, který by definoval přesné pozice polotovarů. Svařování bude založeno na technologickém postupu, a především na zkušenostech svařeče, který vhodným postupem může eliminovat zkroucení celé konstrukce.

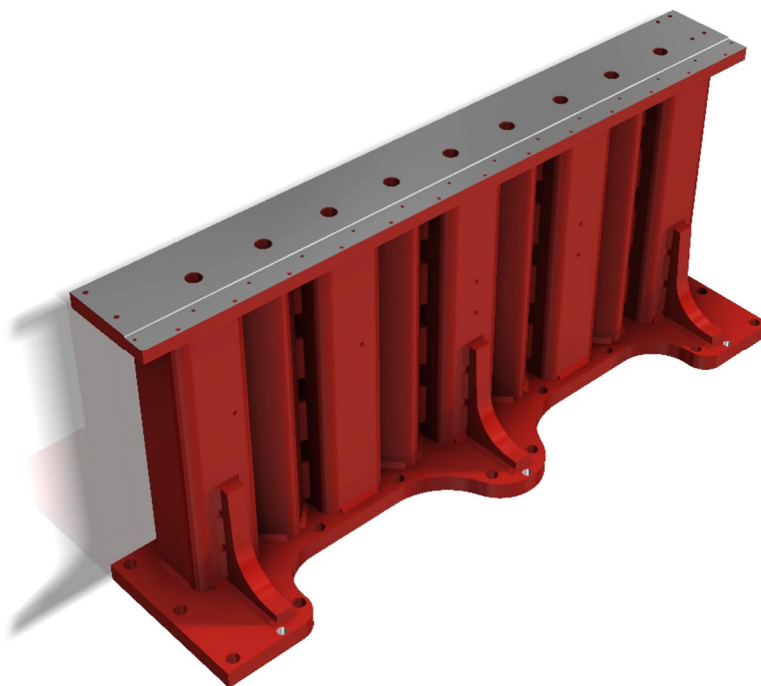
Po svaření je nutné konstrukci vyžít ke snížení pnutí, protože i v případě správné konstrukce a následného promyšleného svaření dojde ke zkroucení. Zkroucení nemusí být ihned po svaření výrazné, ale vnitřní pnutí materiálu by se na konstrukci projevilo např. až v průběhu času, popřípadě při obrábění.



Obr. 36) Zobrazení svařence před obráběním

Po svaření a vyžihání bylo nutné promyslet vyrobiteľnosť pomoci strojů, které má autor k dispozici. Základní obrobení (srovnání ploch, hrubovací operace) bude prováděno na klasické univerzální frézce FA3 AU s vertikální frézovací hlavou. Následné přesnější obrobení plochy a referenční hrany pro vedení (s přídatkem) bude provedeno na frézce WMW Ruhla FUW 315/III, která je vybavena digitálním odměřováním. Obě frézky mají stůl s T drážkami o stejné rozteči, proto byla šířka stojanů volena takovým způsobem, aby mohl být stojan na stůl frézek upnut pomocí upínek z obou jeho stran (volné T drážky po obou stranách stojanů). Těmito stroji bude docílena rovinnost horní a spodní plochy stojanů v toleranci 0,05 mm. Tato rovinnost by např. pro ustavení lineárního vedení byla nevhodná, proto budou horní a spodní plochy stojanů broušeny na rovinné brusce s označením BPH 320A. Tato rovinná bruska je vybavena magnetickou upínací deskou, jejíž délka je 1000 mm a šířka 320 mm. Tím pádem lze upnout (brousit) oba dva stojany na jednu. Nejdříve budou stojany srovnány ze spodní strany, čímž vzniknou přesné rovinné plochy, které budou sloužit pro následné magnetické upnutí stojanů pro broušení horní plochy stojanů. Horní plochy (včetně referenční hrany) slouží pro ustavení lineárního vedení a ložisek kuličkového šroubu (Obr.37). Při broušení „na jedno upnutí“ v případě správného technologického postupu bude dosaženo velmi vysokých přesností, které se pozitivně projeví na geometrické přesnosti celého stroje.

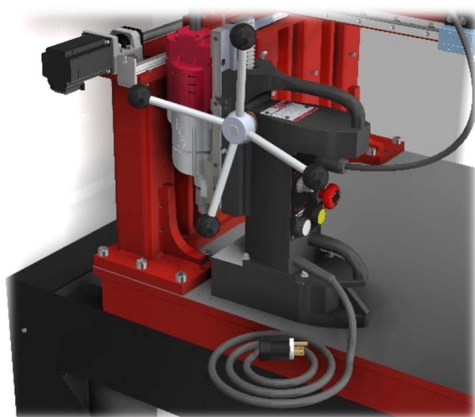
Jelikož není v případě stojanů nutné snižovat jejich hmotnost (nepohybující se hmota), je konstrukce připravena i pro následné vyplnění dutých profilů např. vysokopevnostní betonovou směsí (HPC). Pro aplikaci slouží otvory v horních deskách, které lze po vyplnění dutin hmotou z estetického hlediska zazátkovat. Touto technikou není cílem dosáhnout vyšší pevnosti konstrukce, ale posunutí modálních vlastností konstrukce do vyšších oblastí. Tím by se snížilo riziko rozkmitání konstrukce při předpokládaném provozu, pro který byl stroj konstruován. Pro dané využití stroje je tato varianta pouze uvažována, aby bylo v případě budoucího ladění a úprav možné konstrukci jednoduše vylepšit [12,53].



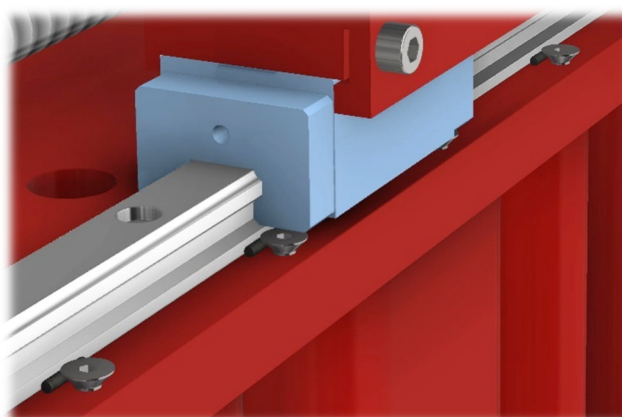
Obr. 37) Stojan po frézování a broušení požadovaných ploch

Závitové otvory v průměrné desce budou realizovány magnetickou vrtačkou (pro stojany i pro stůl). Finální poloha bude zajištěna pomocí tří válcových kolíků pro každý stojan. Ke svrtání magnetickou vrtačkou (Obr. 38) dojde až po montáži příčníku tak, aby bylo docíleno přesné geometrie stroje. Kolíky budou sloužit pro případnou budoucí demontáž a montáž stojanů, aby bylo možné snadněji dosáhnout již jednou nastavené geometrie stroje (časová úspora při opravách). Ovšem jejich častá demontáž není předpokládána, protože k ní nevede žádné větší opodstatnění.

Lineární vedení (kolejnice) budou přitlačovány k referenčním hranám pomocí několika válcových kolíků přitlačovaných ke kolejnicím pomocí sil od kuželových hlav šroubů (Obr. 39).



Obr. 38) Vzájemné svrtání stojanů s průměrnou deskou



Obr. 39) Ukázka způsobu přitlačování kolejnice k referenční hraně za pomoci malých válcových kolíků

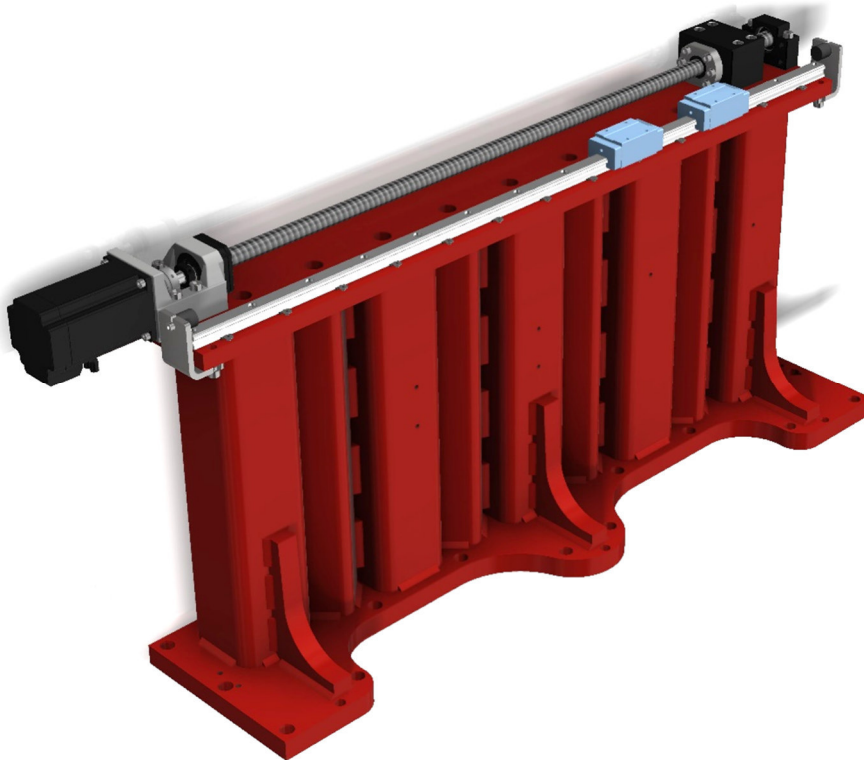
Na obrázku (Obr. 40) je vyobrazena finální podoba již osazeného stojanu. Výpočtem dimenzovaný pohon je osazen do nakupovaného domečku s označením MBA12-C. Do něj je osazena také ložisková jednotka s označením FK12, která zabráňuje pohybu šroubu v radiálním i axiálním směru (pevné uložení).

Krouticí moment z pohonu je na kuličkový šroub přenášen spojkou s označením WKAK 25320810 od společnosti T.E.A. TECHNIK s.r.o., která svými parametry vyhovuje provoznímu zatížení stroje, pro který je stroj navrhován. Jelikož se jedná o svěrnou spojku, je nutné při montáži dodržet utahovací moment předepsaný výrobcem [54].

Matice kuličkového šroubu je uložena do domečku s označením MGD 16. Domeček je nutné ale upravit frézováním nefunkční plochy a převrtáním již předvrtaných děr na větší průměr s následným vyříznutím závitů. Je tomu tak z důvodu, aby byla usnadněno připojení matice k příčníku při montáži (ze shora, kde je prostor pro nářadí).

Na opačné straně se nachází ložisková jednotka s označením BF12, která je tzv. volná (zachycuje pouze radiální síly). Na obou stranách jsou osazeny dorazy, kde jako tlumicí prvek je použit pryžový silentblok od společnosti KIPP CZ s.r.o. typu E.

Krytování os bude řešeno ve společné kapitole pro všechny osy. Jelikož zde byl popisován pouze levý stojan, je vhodné uvést, že pravý stojan je pouze zrcadlený bez jakýchkoliv změn.



Obr. 40) Již kompletně osazený levý stojan bez krytování os a bez osazeného zásobníku nástrojů

6.8.4 Příčník (osa Y)

Příčník je konstrukční část stroje, u které je již kladen důraz na snižování hmotnosti a zároveň docílení požadované pevnosti a tuhosti. Možností řešení je hned několik:

Ocelový svařenec

Při této variantě by bylo velmi těžké dosáhnout nízké hmotnosti. Při použití dutých profilů s tenkými stěnami by bylo nutné výslednou tloušťku navýšit navařením plochých obdélníkových tyčí. Svařovanou konstrukci by bylo nutné znovu vyžít a následně obrobít. V případě svařované konstrukce tvořené několika výpalky lze dosáhnout požadované přesnosti i tuhosti, ale pro vysokou výslednou hmotnost a riziko většího zkroucení při svařování byla tato varianta pro daný stroj zamítnuta.

Hliníkový profil

U levnějších strojů již dostupných na trhu je velmi často využívaným polotovarem hliníková profilová tyč. Ta je vyráběna v několika variantách a při vhodném volbě se pro některé aplikace nemusí jednat o špatné řešení. Nicméně pro navrhovaný stroj a pro relativně velkou vzdálenost mezi stojany byla tato varianta shledána jako nevhodná.

Lze také uvažovat nad svařencem z hliníkových desek, ale tato varianta byla z hlediska technologické náročnosti, a tím pádem vysoké ceny za provedení, zamítnuta.

Montovaný příčník

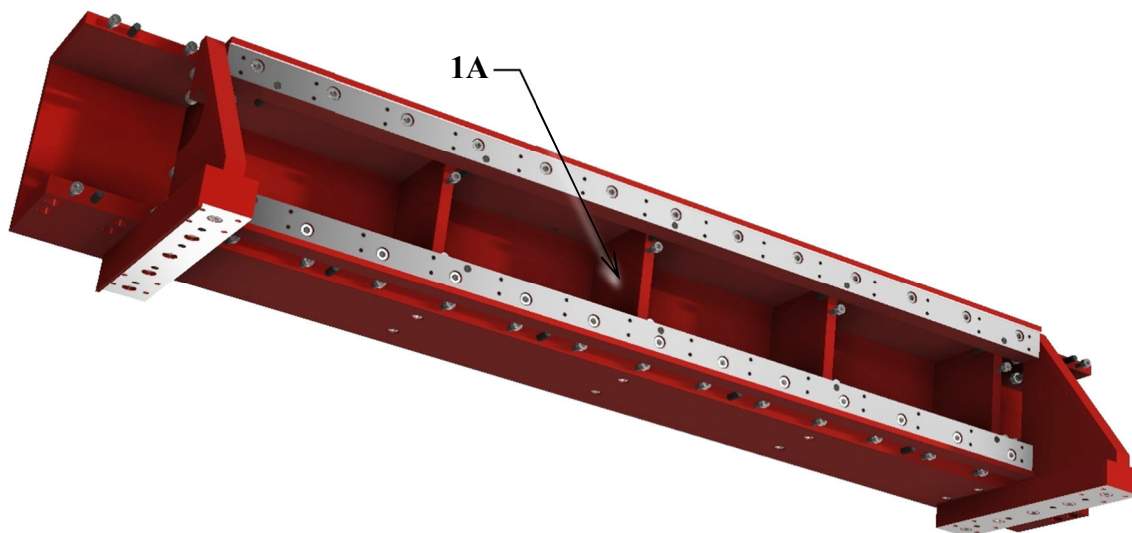
Jako materiál jednotlivých desek (i pro saně a smýkadlo) je shledán jako nejvhodnější tzv. letecký dural EN AW 7075, který má pevnost odpovídající (spíše vyšší než) běžné konstrukční oceli, přičemž výsledná hmotnost je téměř třetinová. Dříve byl tento materiál velice drahý a doslova uplatnitelný pouze v leteckém průmyslu, ale nyní je cena velmi přiblížena ostatním hliníkovým slitinám, a proto ji lze doporučit pro navrhovaný příčník. Další alternativní možností je využití dutých hliníkových (duralových) profilů např. od společnosti Minitec, které by pro danou aplikaci taktéž s největší pravděpodobností vyhovovaly [55].

Autorem této práce bylo ale rozhodnuto pro montovanou konstrukční variantu (Obr. 41), protože je jeho snahou navrhnout co nejvíce univerzální (částečně modulární) konstrukci. Např. pro tvorbu celé produktové řady (stejně koncepce, pouze jiná velikost a výkonost) lze při vhodném dimenzování velmi rychle a efektivně vytvářet technickou dokumentaci bez opětovného neefektivního modelování a kreslení výkresů. Předpokladem je úplně parametrizovaný 3D model.

Do jednotlivých naformátovaných desek budou obrobena díry se závity a díry pro šrouby. Následně bude celá konstrukce složena s co nejvyšší pečlivostí pro docílení co nejlepší geometrické přesnosti (kolmost, rovnoběžnost atd.).

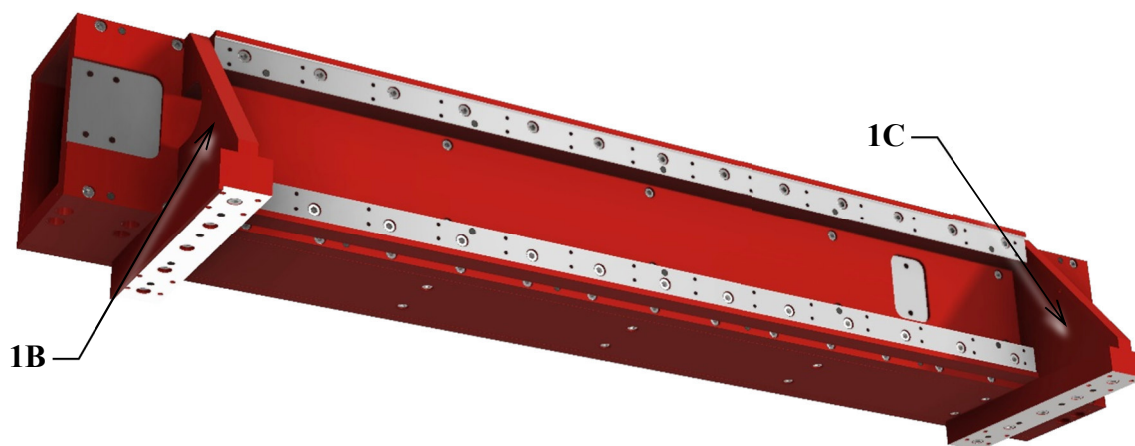
Poté bude konstrukce svtána, aby již jednotlivé desky mohly být vůči sobě pevně ustaveny pomocí válcových kolíků. Takto kolíky osazená sestava bude následně obrobena na již zmíněných vertikálních frézkách. Obrábět se budou plochy pro ustavení pohonu, ložisek, lineárního vedení včetně referenčních hran a spodních ploch, které slouží ke spojení příčníku k vozíkům lineárního vedení v ose X (na stojanech).

Průběžné analýzy pomocí metody konečných prvků prokázaly jako vhodné doplnit příčník vnitřními výztuhami (1A), což odpovídá i technickému doporučení dle literatury [12].



Obr. 41) Vizualizace příčníku (s neviditelnou přední deskou) pro zobrazení pozic vnitřních výztuh

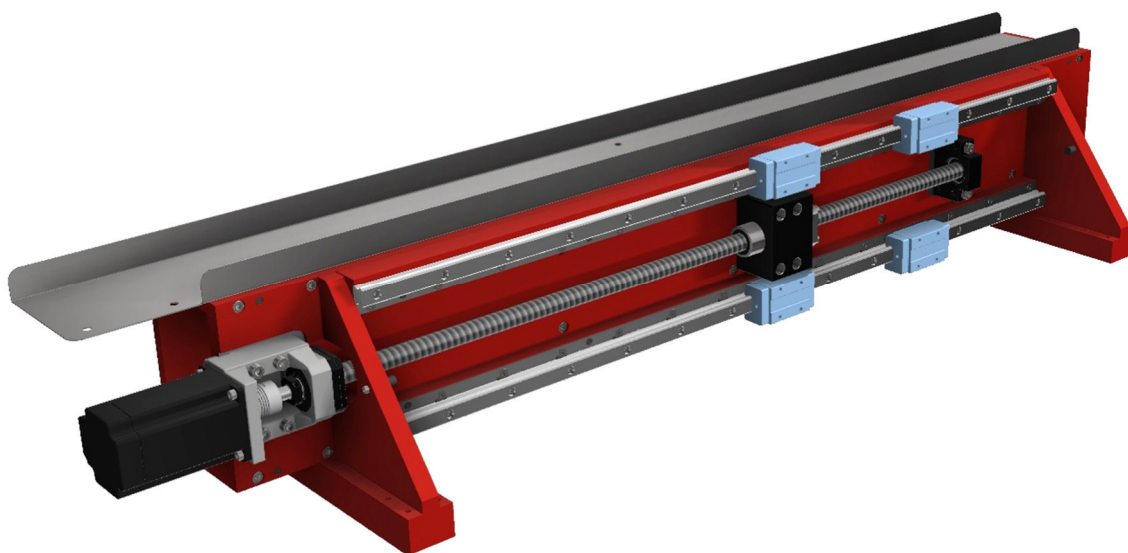
Také pro zvýšení tuhosti bude tato sestava na závěr (po obrobení všech funkčních ploch) osazena trojúhelníkovými výztuhami (1B a 1C), které již nebudou kolíkovány, ale pouze připevněny pomocí šroubových spojů (Obr. 42).



Obr. 42) Příčník ve stavu po obrobení všech funkčních ploch a již doplněný o trojúhelníkové výztuhy 1B a 1C

Mírné geometrické i polohové nepřesnosti, které budou dány nepřesnou výrobou (vzhledem k uvažovaným strojům), budou následně kompenzovány pomocí přesných vymezovacích podložek. Toto možné seřízení bude popsáno ve společné kapitole pro všechny osy navrhovaného stroje.

Na obrázku (Obr. 43) je vyobrazen již kompletně osazený příčník. Všechny komponenty jsou totožné s komponentami, které jsou použity v ose X (horní gantry na stojanech).



Obr. 43) Již kompletně osazený příčník (horní žlab z eloxovaného hliníkového plechu slouží pro vedení a montáž energetického řetězu)

6.8.5 Saně a smýkadlo (osa Z)

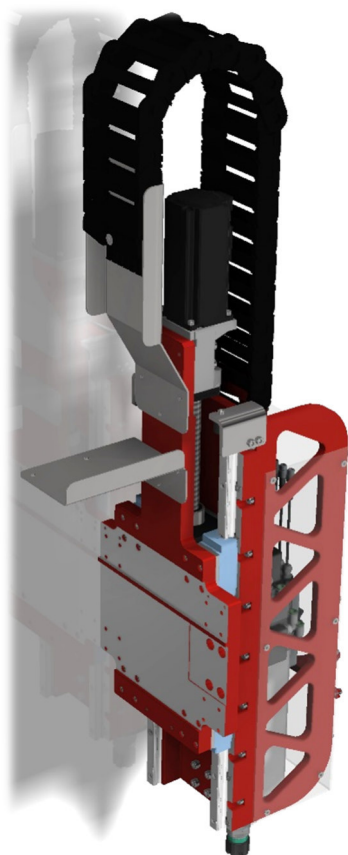
Osa Z je řešena obdobně jako osa Y (příčník). I zde se jedná o montovanou sestavu, u které má následně dojít k obrobení funkčních ploch (Obr. 44 a Obr. 45).

Saně jsou jako jediná komponenta obráběny na CNC řízené frézce, protože se jedná o relativně na přesnost náročný díl, jehož případné odchylky od předepsaných rozměrů (i geometrických tolerancí atd.) by se těžko při montáži seřizovaly.

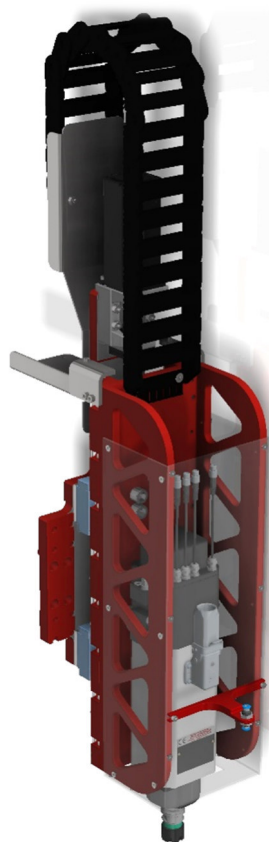
Uspořádání lineárního vedení včetně vozíku je tzv. inverzní, protože lineární vedení (kolejnice) je přimontováno k samotnému smýkadlu a následné spojení k saním je řešeno přes vozíky lineárního vedení. Bylo tomu tak zvoleno z důvodu zástavbových rozměrů, které vyplývají z relativně vysokého pracovního rozsahu v ose Z.

Jak je patrné na obrázcích (Obr. 44), vozíky nejsou montovány přímo proti sobě. Tato varianta vykazuje menší tuhost, protože může snadněji docházet k deformacím saní. Přesto bylo raději rozhodnuto pro dostatečné naddimenzování saní, protože takto „vzájemně posunuté“ protilehlé vozíky usnadňují montáž či případný servis.

V případě osy Z bylo také zvažováno umístění pohonu na zadní část saní. Náhon kuličkového šroubu by byl poté řešen vhodně dimenzovaným ozubeným řemenem při zachování stejného převodového poměru. Při tomto konstrukčním uspořádání by byla snížena zástavbová výška v ose Z, která ale není požadována. Už ze samotného principu použití dalších komponent (řemene, řemenic atd.) a z nich vyplývajících možných komplikací bylo voleno stejné uspořádání pohonu kuličkového šroubu jako v osách X a Y.



Obr. 44) Řešení osy Z ve dvou pohledech pro vyobrazení celkového uspořádání (včetně saní)



Obr. 45) Konstrukční řešení smýkadla

6.8.6 Pracovní stůl

Požadavky na pracovní stůl jsou v případě frézování a 3D tisku odlišné, proto je nutné se zaměřit na každou z technologií zvlášť.

CNC frézování

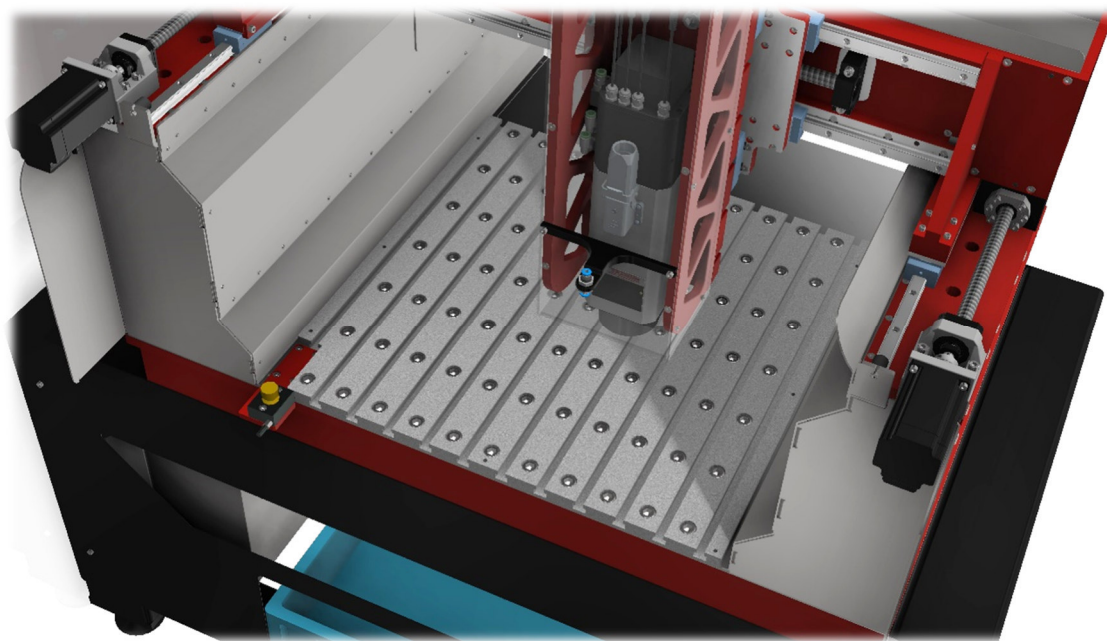
Pracovní stůl bývá u modelářských CNC frézek nejčastěji řešen těmito způsoby:

- Vakuové upínání
- Děrovaný stůl se závity
- Stůl s drážkami ve tvaru „T“

Jelikož je stroj postaven na průměrné desce, dalo by se uvažovat nad jejím využitím i jako pracovní stůl. Závrtové díry v průměrné desce by sloužily k upínání polotovarů. Další variantou, která by mohla v případě frézování měkkých materiálu vyhovovat, je použití upínacích systémů a přípravků, které jsou běžným příslušenstvím např. ke svařovacím stolům.

Nicméně pro dané využití bylo jako nejvhodnější a nejuniverzálnější shledáno řešení pracovního stolu ve formě stolu s „T“ drážkami. Takto koncipované stoly jsou u modelářských frézek vyráběny z litého hliníku, jejichž horní plochy jsou pro docílení dostatečné rovinnosti broušeny. Výsledná tuhost pracovního stolu je podpořena dostatečným množstvím kotvicích šroubů, přičemž rovinná průměrná deska celkovou tuhost i rovinnost podporuje.

Konkrétní stůl (viz Obr. 46) byl vybrán ve velikosti 600×600 mm z nabídky CNC shop. Tím pádem lze snadno upínat polotovary o velikosti 500×500 mm [56].



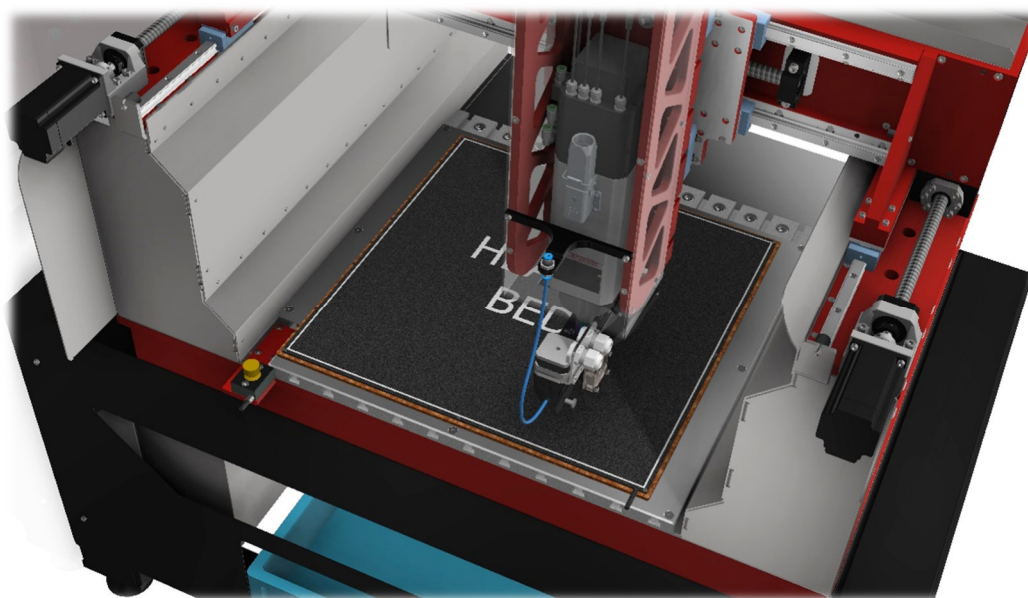
Obr. 46) Pracovní stůl s „T“ drážkami

3D tisk

Tato technologie vyžaduje rovnou plochu bez děr. U takto rozměrné tiskové plochy je nutné eliminovat roztážnost tiskového materiálu. Z tohoto důvodu je nutné vybrat vhodnou vyhřívanou desku, která eliminuje vznik možných trhlin tištěného objektu.

Jako vhodná vyhřívaná podložka určená pro tiskové účely byla shledána hliníková vytápěna deska se skleněným povrchem (Obr. 47) od společnosti Zyltech s označením 3DP-HTBD-500-CTGLS [57]. Plocha vyhřívané tiskové podložky je 500×500 mm. Její napájení je řešeno přívodem 24 V stejnosměrného napětí. Pro tuto velikost je uveden příkon 480 W, který je nutný především k prvnímu nahřívání podložky před zahájením tisku. Je možné dosáhnout maximální teploty 110 °C, která je naprosto vyhovující pro většinu tiskových materiálů.

Pro podporu rovnoměrného prohřátí a částečného odizolování vyhřívané podložky od spodního stolu je vložena korková deska o tloušťce 5 mm. Následně je celý tento set spojen s hliníkovou deskou, která slouží k finálnímu upnutí tiskové podložky na stůl (s „T“ drážkami) pomocí 8 šroubů. Závity jsou vyřezány do hliníkového stolu, aby byla montáž co nejrychlejší (oproti rozmístování matic v drážkách). Poté po upevnění stačí jen připojit konektor napájení a tisková podložka je připravena pro provoz.



Obr. 47) Vyhřívaná tisková podložka přimontována ke stolu s „T“ drážkami

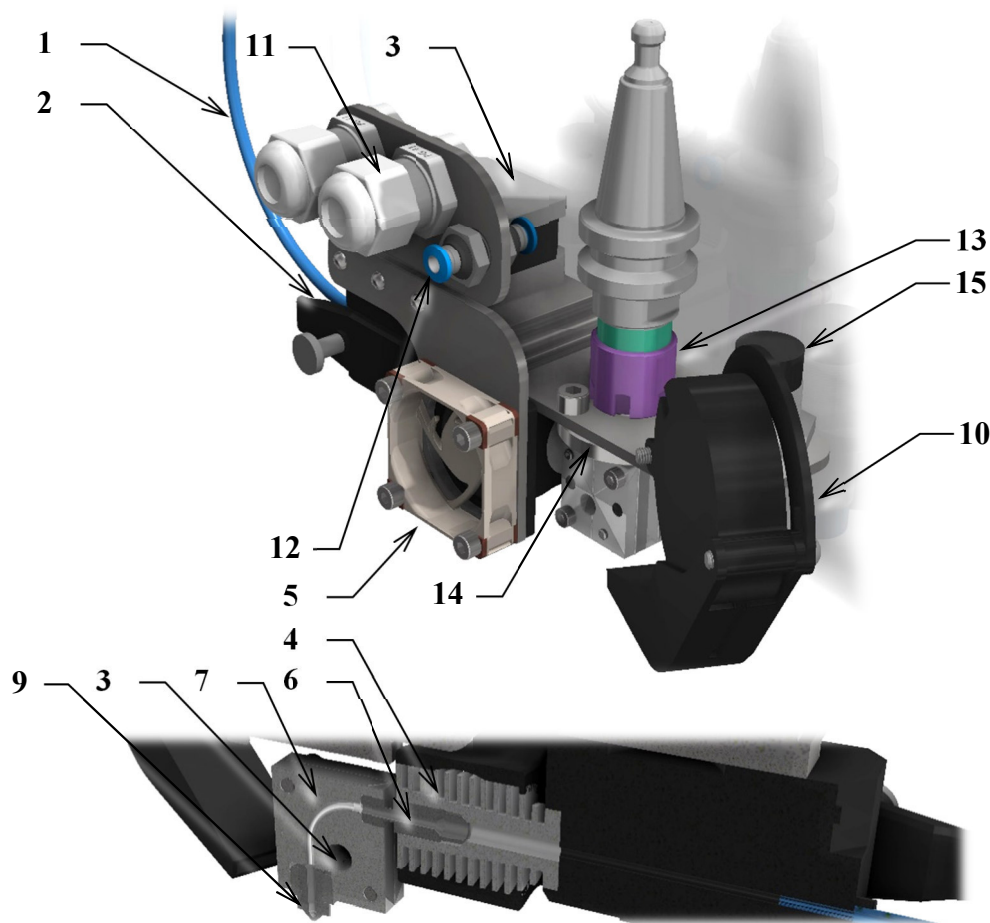
6.8.7 Tisková hlava

Tiskovou hlavu a její upevnění bylo možné provést v několika variantách. V první fázi vývoje byla uvažována výměna tiskové hlavy za frézovací vřeteno, ale takto řešená výměna by byla pro obsluhu nekomfortní. Další variantou bylo možné upínání tiskové hlavy do externího držáku a případná automatická výměna s uchycením pomocí magnetů.

Takováto řešení by měla smysl spíše u samostatných 3D tiskáren. Z důvodu vysoké prašnosti a případného chlazení při frézování je nutné mít tiskovou hlavu při obrábění chráněnou proti těmto vlivům. Proto bylo rozhodnuto pro upínání tiskové hlavy pomocí kužele do samotného vřetene, avšak ne automaticky, ale v ručním režimu obsluhou. Mimo tiskové operace bude tedy tisková hlava umístěna mimo zařízení.

Aby nebylo nutné vyvíjet novou tiskovou hlavu, kterých je na trhu hned několik, bylo rozhodnuto pro extrudér Bondtech Mini Geared (BMG) od společnosti Bondtech. Ve spojení s hot endem „teplou částí“ tiskové hlavy od společnosti E3D (verze V6 v provedení titanovém) vzniká vyzkoušená kombinace, která je v rámci tiskařské komunity oblíbená [58,59].

Jako výchozí model byla brána sestava určená pro přestavbu nejrozšířenějších tiskáren za účelem zvýšení kvality tisku [59]. Tuto sestavu bylo však nutné přestavět (viz Obr. 48), aby její montáž nezabírala mnoho prostoru v ose Z, čímž by se výrazně snížila maximální výška tištěných objektů.



Obr. 48) Přeprogramovaná tisková hlava pro navrhovaný stroj

Tisková struna je naváděna bowdenem (1) do místa extruderu, v překladu podavače (2). Extruder, jehož akčními prvky jsou kola s jemným ozubením, je poháněn krokovým motorem (3), který je s ním přímo dodáván. Poté je struna vedena tzv. studenou částí, která je tvořena chladičem (4), jenž je ochlazován ventilátorem (5). Studená část od následující teplé části je oddělena tzv. heat breakem (6), který má za úkol přenášet co nejméně tepla do studené oblasti (natavování materiálu před tryskou s rizikem ucpání chladiče).

Teplá část (heater block, pozice 7) byla zkonstruována se zakřivením dráhy do pravého úhlu (tím se snížila zástavba prostoru v ose Z). Heater block je konstruován ze dvou částí, aby byla jeho výroba technologicky možná (frézování dráhy kulovou frézou atd.). Součástí je snímač teploty a topné tělísko, které bude ve válcovém otvoru (8) zajištěno dvěma malými stavěcími šrouby. Sestava je konstruována pro použití trysky (9) pro průměr tiskového materiálu 1,75 mm.

Tisková hlava je doplněna ventilátorem (10), který má za účel ochlazovat právě vytlačený materiál. Tato vlastnost je velmi podstatná pro tisk tzv. „mostů“, kdy je nutné v horizontálním směru spojovat dvě a více těles ve vzduchu.

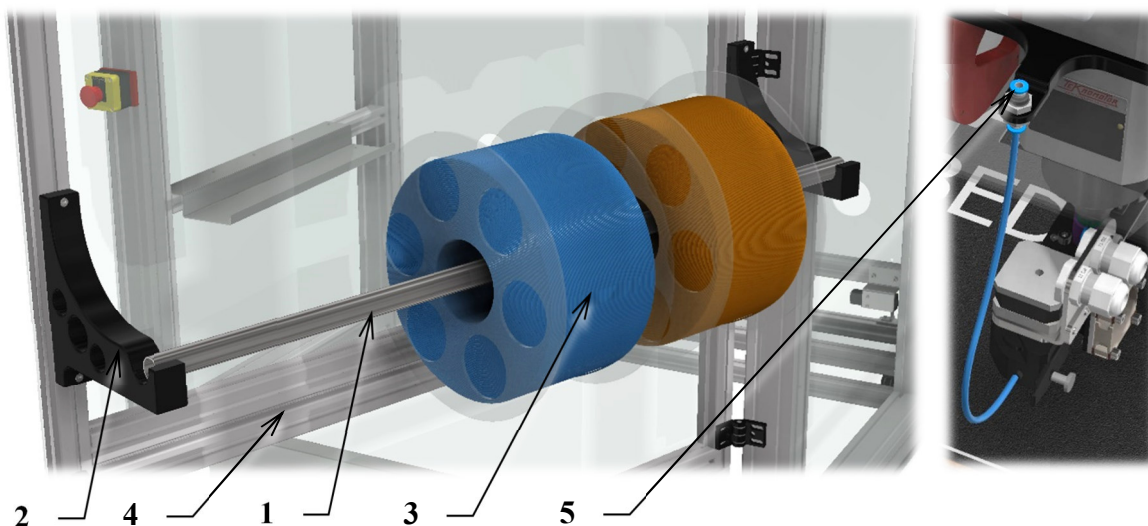
Součástí tiskové hlavy jsou dvě kabelové vývodky (11), jimiž budou vedeny kabely k napájení (ovládání) krokového motoru extruderu, ventilátoru chladiče a ventilátoru oblasti okolo trysky, nahřívání a měření teploty heater bloku. Kabely budou osazeny vhodnými konektory, které budou připojeny ke konektorům na stroji (u vřetena).

Pro případnou budoucí modifikaci byla přidána průchodka pro vzduchovou hadici (12). Použitím stlačeného vzduchu a trysky nastavené na chladič (případně oblast právě vytištěného materiálu) by bylo reálné intenzivnější chlazení.

Upínání do kužele ve vřetenu je realizováno pomocí kleštinového upínače (13) a válcové stopky (14). Výhodou této koncepce je sousost osy trysky s osou vřetena, tudíž není nutné zabývat se nežádoucím vlivem pootočení tiskové hlavy nebo řešením brzdy (aretace) vřetena či tiskové hlavy. Ustavení trysky do osy vřetena lze realizovat měřením pomocí číselníkového úchylkoměru, nebo lze vytvořit jednoduchý přípravek.

Indukční senzor (15) slouží pro referování osy Z při 3D tisku. Jelikož je vyhřívaná deska relativně rozměrná, lze v případě hliníkového provedení předpokládat po zahřátí mírné deformace. Pokud by tyto deformace byly vyšší, je vhodné provést měření v několika bodech. V případě zjištění, že nedochází k deformacím, lze využít ke snímání senzor výšky nástroje, kterým bude stroj vybaven. V tomto případě by bylo ale nutné mít trysku očištěnou od zbytku vytlačeného materiálu, aby bylo měření co nejpřesnější.

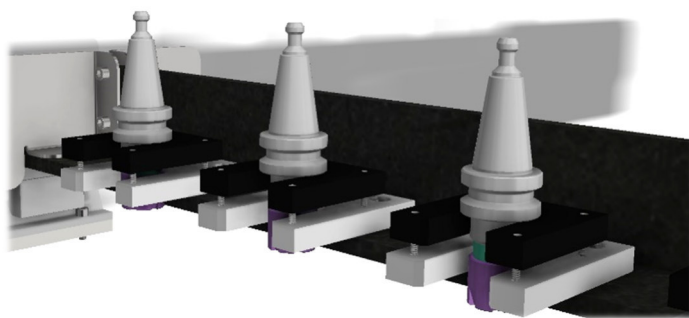
Tiskový materiál je ve formě struny, která je namotána na cívkách (Obr. 49). Jako držák cívek je použita nerezová trubka (1), která je uložena ve dvou držácích vyrobených na 3D tiskárně (2) na předních dveřích. Průměr trubky vyhovuje jak standardním cívkám o hmotnosti 1 kg, tak také pro cívky o hmotnost 8 kg (3). Tisková struna je následně úzkou mezerou mezi hliníkovými profily (4) navedena do pneumatické spojky (5), odkud je materiál veden polytetrafluorethylenovou (PTFE) hadičkou do extruderu. Pneumatická spojka je umístěna ve vyšší pozici, aby bylo zabráněno volnému pohybu struny v pracovním prostoru stroje.



Obr. 49) Držák tiskového materiálu

6.8.8 Zásobník nástrojů

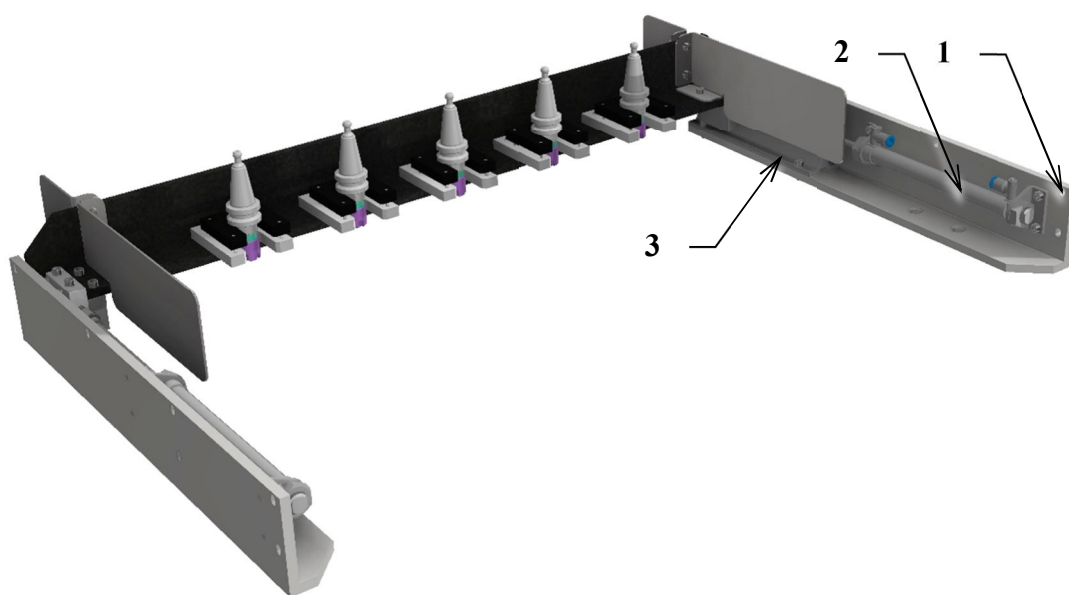
Zásobník nástrojů je vedlejší periferie k automatické výměně nástrojů, která je integrována ve vybraném vřetenu. Zásobník je konstruován pro 5 pozic. Jako držák nástrojů je vybrán držák nabízený společností Sorotec [60], jenž je zobrazen na obrázku (Obr. 50). Jeho odpružení kompenzuje nepřesnost pozice nástroje vůči vřetenu při upínání a tím zabraňuje poškození vnitřního upínacího kužele ve vřetenu, jehož případná oprava je finančně nákladná.



Obr. 50) Držák nástrojů nabízený společností Sorotec s označením WZW.TDI.SK20WA

Aby zásobník nástrojů neomezoval pracovní plochu stroje, je nutné použít mechanismus, pomocí kterého bude zásobník přesouván ke vřetenu. Mechanismus jako celek bude montován k pravému a levému stojanu. Výšku (vodorovnost vůči stolu) lze seřizovat pomocí drážek v bočních držácích (1) (Obr. 51). Pohyb je realizován dvěma pneumatickými pohony DSNU 16-130-PPV od společnosti Festo podél každého stojanu (2). Aby nedocházelo ke „křížení“ vlivem nestejnoseměrného chodu, je vybráno valivé podepřené vedení (3), které je oproti prizmatickému lineárnímu vedení cenově výhodnější a pro tuto aplikaci vyhovující.

Pneumatické válce budou doplněny o škrticí ventily, aby byl pohyb co nejvíce plynulý (i za cenu vyššího času na výměnu nástroje). Krajní polohy zásobníku nástrojů (domácí a pracovní) budou kontrolovány pomocí snímačů umístěných na tělesech válců.



Obr. 51) Konstrukční řešení zásobníku nástrojů

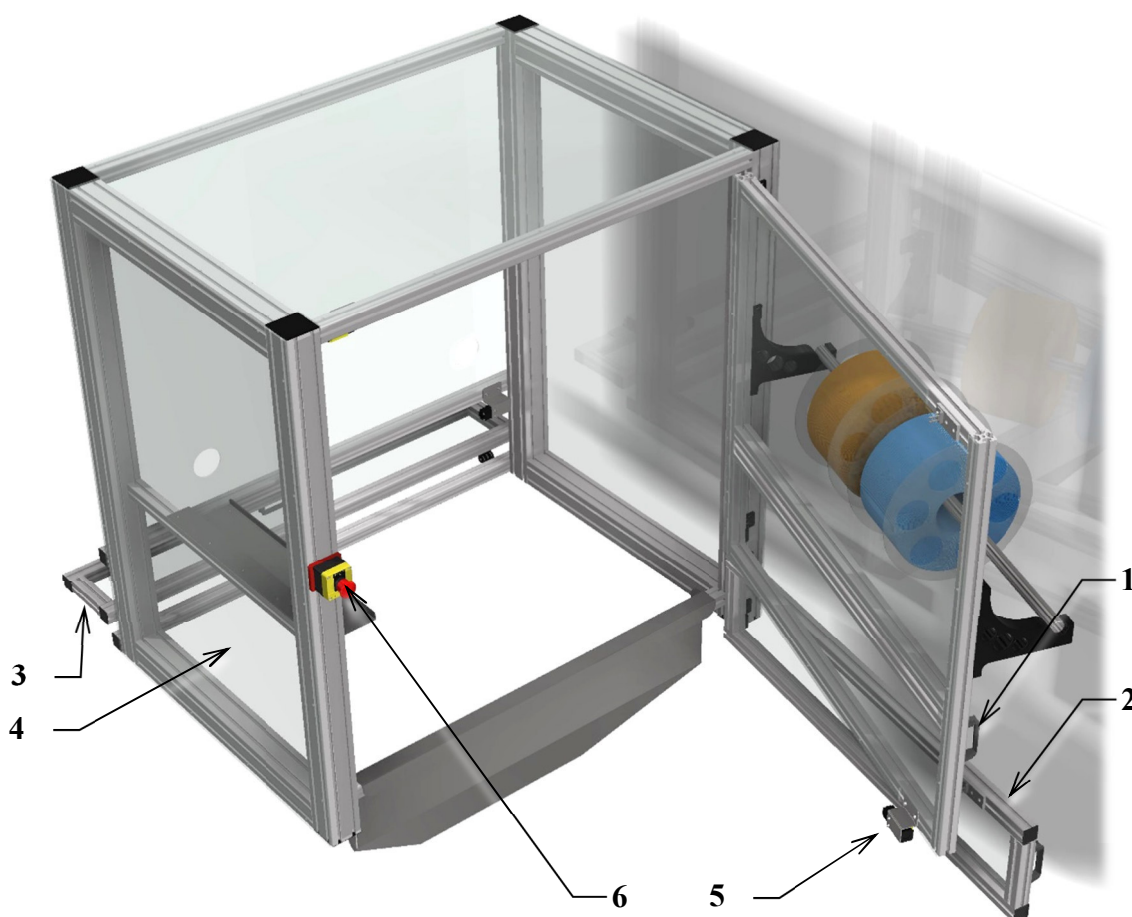
6.8.9 Krytování stroje (bezpečnost, přívod energií, třískové hospodářství aj.)

„Obráběcí stroje, uváděné na trh v zemích EU, musí být v souladu se všemi příslušnými právními předpisy. Za tento soulad odpovídá jak výrobce stroje, tak subdodavatelé komponent, a to podle role, kterou mají v dodavatelském řetězci. Všechny informace, které výrobce poskytuje, musí být správné, úplné a s v souladu se všemi příslušnými pravidly EU.“ (Jiří Marek a kolektiv, 2014, s. 66)

Z hlediska obsáhlosti problematiky bezpečnosti (s ní související analýzy rizik atd.) je součástí této práce popis řešení krytování stroje, které je z hlediska bezpečnosti pro provoz zařízení zcela zásadní.

Hlavní bezpečnostní krytování

Konstrukce bezpečnostního krytu (Obr. 52) je složena z hliníkových profilů společnosti Alutec. Přední strana je vybavena dvěma dveřmi. Při běžném provozu stroje bude obsluha používat madlo (1), které slouží pro otevření obou dveří. Spodní nízké dveře (2) slouží pouze pro obrábění dlouhých předmětů, které lze prostrčit strojem a po částech frézovat. K tomuto frézování dlouhých předmětů slouží i dveře (3) na zadní straně. Výplně dveří a všech ostatních stěn jsou řešeny bezpečnostním průhledným sklem (4).



Obr. 52) Konstrukční řešení hlavního bezpečnostního krytování

Zajištění a bezpečnost dveří je řešeno elektromechanickým blokovacím zařízením Sick i12S (5) pro každé dveře zvlášť. Toto blokovací zařízení se skládá z hlavního těla (zámku), které je pevně spojeno s rámem, a ovladače (klíče), který je pevně spojen s dveřmi. Při otevření dveří musí logika řídicího systému provést nutná opatření (zastavení vřetena, zastavení pohybu v jednotlivých osách atd.), které se řídí normou ČSN EN ISO 16090-1.

Bezpečnostní systém je také doplněn nouzovým bezpečnostním STOP tlačítkem (6) na přední straně zařízení, kterým je obsluha oprávněna v případě nouze stroj zastavit.

Krytování konstrukčních částí a celků

Krytování jednotlivých komponent je také prováděno z důvodu prodloužení jejich životnosti, zamezení vniku nečistot do mechanismů, což by mohlo vést vlivem nárůstu tření až k jejich zadření a také čistě z uživatelského hlediska, aby byl provoz a údržba stroje pro obsluhu či seřizovače co nejvíce komfortní.

Kuličkové šrouby a lineární vedení

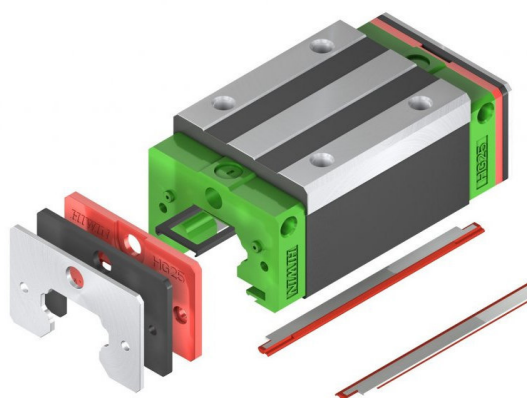
Jednou z nejdůležitější a nejnákladnější komponentou na obráběcím stroji jsou pohybové šrouby. Při obrábění a případném chlazení se třísky a chladicí kapalina dostává prakticky do všech nechráněných míst. Kuličkové šrouby budou ve všech osách (4 šrouby) opatřeny kruhovým krycím měchem (Obr. 53). Kruhový krycí měch je vybrán od stejného výrobce jako kuličkové šrouby TBI Motion. Dle konzultace se společností Power Belt je kruhový krycí měch dodáván na základě objednávky s uvedenými přesnými zástavbovými rozměry. Krycí měch není součástí modelu, protože nastavení flexibility (pro simulaci pohybů) je náročné na výpočetní výkon používaného počítače.

Na obrázku (Obr. 54) je zobrazeno těsnění od společnosti HIWIN, které funguje na stejném principu jako těsnění od společnosti TBI Motion, pro které bylo rozhodnuto (konkrétně typ s označením SZ). Tyto varianty ochrany lineárního vedení jsou vhodné pro ochranu vedení před horkými třískami a dřevěným prachem [72].

Další variantou je použít široké měchy, které lze pro danou zástavbu realizovat. Nicméně cena je oproti zde uvedeným variantám vysoká a pro modelářskou frézku tudíž finančně nevýhodná.



Obr. 53) Kruhový krycí měch, zde od společnosti Hennlich [61]



Obr. 54) Ochrana lineárního vedení nabízená společností HIWIN [42]

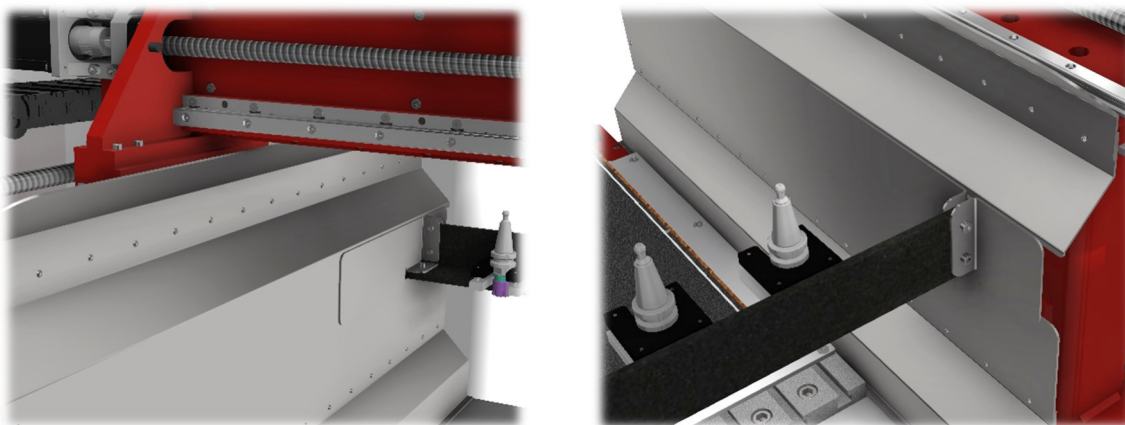
Energetické řetězy

Energetické řetězy jsou vybrány od společnosti Hennlich, kde díky srozumitelnému konfiguratoru lze vybrat vhodný typ a velikost. Následně je generován CAD model s objednávkovým číslem. Vybrán byl základní typ s vnitřními rozměry 80 mm x 25 mm pro všechny 3 osy. Tato předimenzovaná velikost umožňuje v budoucnu možné rozšíření stroje o další funkcionality bez nutnosti náhrady energetických řetězů či jiných nemístných improvizací. Tato velikost je také odvozena z požadavku přívodu pneumatického vzduchu do vřetena a přívodu energií do tiskové hlavy [62].

Krytování stojanů

Krytování stojanů (Obr. 55) má hned několik důvodů. Bez krytování by bylo obtížné odstranit všechny nečistoty a třísky z relativně tvarově složitých stojanů. Druhým důvodem byla nutnost krytovat pohybový mechanismus zásobníku nástrojů, aby nedocházelo k zadírání pístní tyče a tím pádem k nežádoucím trhavým pohybům. Třetí důvod je spíše estetický, protože obsluha není rušena složitými tvary, ale jednoduchým a funkčním designem.

Horní lem slouží k částečné eliminaci doletu třísek a chladicí kapaliny až na kuličkový šroub a vedení. Tomuto jevu však nelze mechanicky zabránit, proto je krytí kuličkového šroubu řešeno již popsáním způsobem. Celá krycí bočnice je tvořena nerezovými plechovými dílci, které jsou spojeny pomocí nýtových spojů (lze realizovat také bodovými svary). Tvar je volen co nejstrmější, kdy je úhel větší než 45°. Tím je zaručen skluz většího množství třísek a nečistot na stůl, z kterého lze třísky dostat až do spodního zásobníku třísek, který je popsán v následující části této práce.



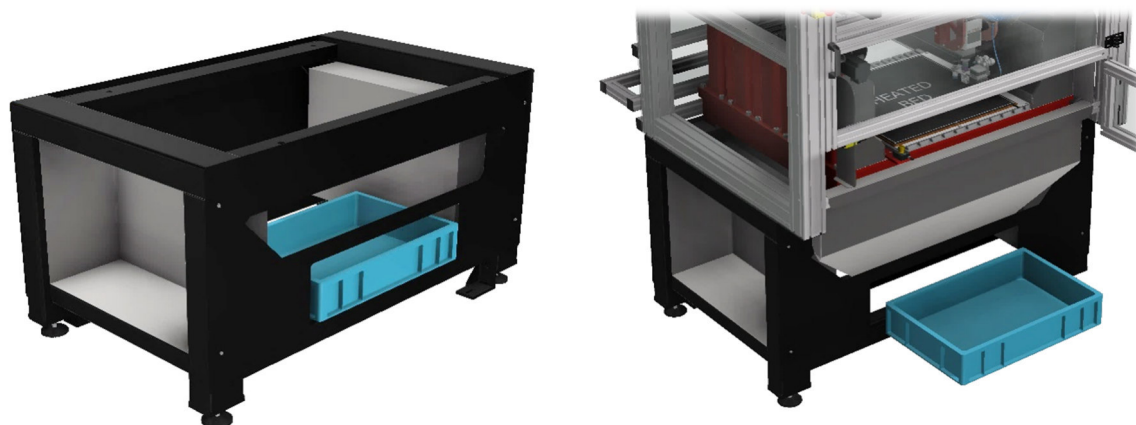
Obr. 55) Funkční krytování stojanů pro snadnou údržbu a ochranu pohybového mechanismu zásobníku nástrojů

Krytování spodního stolu s řešením třískového hospodářství

Pro snadný úklid a správu třískového hospodářství byl vytvořen průchozí nerezový skluz z pracovního prostoru do základního rámu stroje (Obr. 56). Průchod je realizován mezerou mezi horním bezpečnostním krytím a přední hranou příměrné litinové desky. Následně třísky jsou obsluhou smeteny do plastového EURO boxu o velikosti 600×400×120 mm. Při naplnění lze box jednoduše vyndat ze přední části stroje.

Další variantou je třískový dopravník, ale to je opět pro zamýšlenou modelářskou frézku nadbytečná a finančně nákladná varianta. Také se nabízí řešit i přímé odsávání především

dřevěného prachu, které lze realizovat přidáním odsávací flexibilní hadice co nejbližší k místu obrábění (nejjednodušeji z horní části zařízení). Samotné odsávání by bylo nutné dostatečně dimenzovat. Jeho zabudování není realizováno, ale rovněž je daným konstrukčním uspořádáním snadno realizovatelné.



Obr. 56) Krytování spodního stolu s řešením třískového hospodářství

6.9 Možnosti seřízení geometrie stroje a zvýšení přesnosti

Výslednou geometrickou přesnost lze ovlivnit vhodnou konstrukcí, přesnou výrobou dle správné výkresové dokumentace a důkladnou montáží. Jelikož je každý výrobek vyráběn v určité toleranci a snížení tolerančního pole u všech komponent by vedlo k rapidnímu zvýšení výrobní ceny, je nutné umožnit seřízení stroje během montáže.

Každá osa je řešena tím způsobem, že obě lineární vedení (kolejnice) jsou dotlačovány na referenční hranu. Vozíky na jedné straně jsou též přisazeny k referenční hraně, ale vozíky na protilehlé kolejnici jsou již upevněny pouze šrouby bez použití referenční hrany („volné“ uložení). Takovéto uspořádání vychází z doporučení výrobců lineárních vedení.

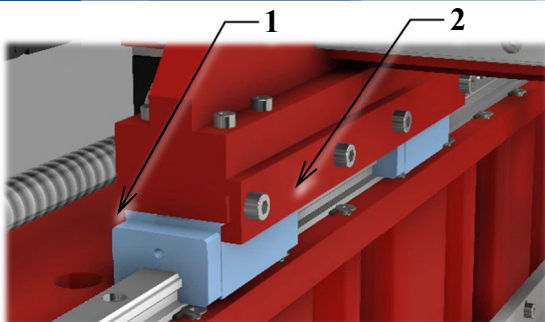
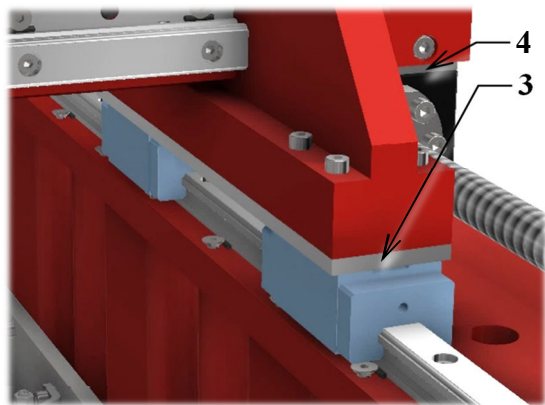
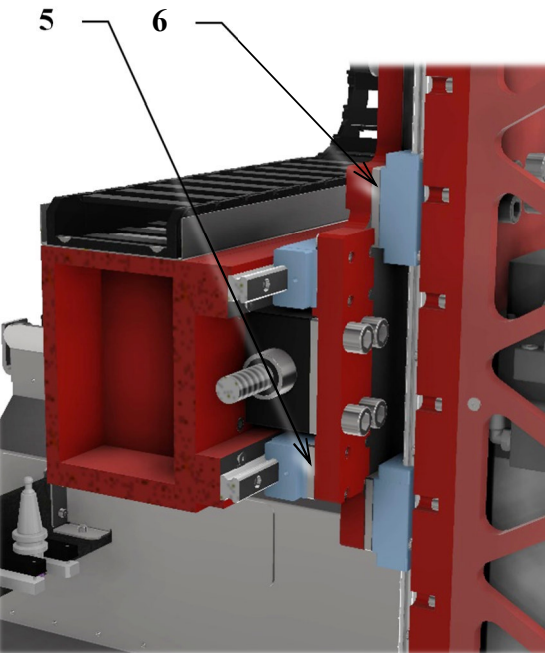
Dotlačování kolejnic k referenčním hranám je řešeno malými válcovými kolíky, které jsou přitlačovány k vedení kuželovou hlavou šroubů. Toto řešení je pro danou velikost stroje dostačující. Dotlačování boční lištou vyžaduje boční díry se závitem, proto by bylo nutné obrobek v případě obrábění na uvažovaných vertikálních frézách přepnout, což navyšuje výrobní čas i výslednou cenu.

Referenční hrany jsou náročnější na výrobu, ale snižují dobu montáže. Montér nemusí provádět náročná měření a ustavování, při jejichž chybném provedení by stroj nemohl pracovat v předpokládané přesnosti a byla by mu snížena životnost komponent (lineárního vedení a kuličkových šroubů).

Vždy na jedné straně je mezi vozíkem a připojovacím tělesem umístěna broušená podložka o tloušťce 5 mm. Jejich finální tloušťka bude upravena na základě důsledného měření geometrie stroje. Měření bude probíhat nahrazením podložek skládanými Johansonovými měrkami. Správnou kombinaci (finální tloušťku podložky) lze ověřit měření pomocí např. číselníkového úchylkoměru upnutého v kuželu vřetena.

Tabulka (Tab. 34), která je doplněna vyobrazením konkrétních konstrukčních částí, ukazuje místa, kde lze pomocí změny tloušťky podložky seřizovat geometrii stroje.

Tab 34) Možnosti seřízení geometrie stroje (v jednotlivých osách)

MOŽNOSTI SEŘÍZENÍ GEOMETRIE STROJE		
Osa	Popis	Vyobrazení konstrukční části
	Konstrukční řešení ustavení vedení na levém stojanu bez možnosti seřízení. Vozíky jsou přitlačeny k referenční hraně (1) a dotlačeny boční deskou (2).	
X	Na pravém stojanu je kolejnice opět dotlačována k referenční hraně, ale vozík je uložen (na volno). Pomocí podložky (3) lze měřením a přesným dobroušením na požadovaný rozměr dosáhnout úplné rovnoběžnosti osy Y vůči rovině stolu. V neposlední řadě je na finální rozměr dobroušena podložka (4) mezi maticí a příčnickem na obou stojanech osy X (toto platí pro všechny osy X, Y a Z).	
Y	Obě kolejnice lineárního vedení na ose Y jsou dotlačovány k referenční hraně. Pár vozíků na horní kolejnici je taktéž dotlačován k referenční hraně (přístupné ze shora). Spodní pár vozíků je uložen „na volno“ opět s možností seřízení ve formě přesného dobroušení podložky (5). Tímto způsobem lze seřídit kolmost vřetena vůči rovině stolu (v rovině XZ).	
Z	Podobný způsob seřízení lze praktikovat i u osy Z. Zde jsou podložky určeny pro pár vozíků na levé kolejnici (6). Protější pár vozíků je opět ustaven vůči referenční hraně. U osy Z slouží seřízení pouze ke kompenzaci výrobních nepřesností.	

Těmito způsoby a při vhodném postupu lze docílit v rámci modelářských frézek přesné geometrie stroje. Další nepřesnost bude způsobena deformacemi od řezných sil (lze částečně eliminovat frézováním poslední třísky s menším úběrem materiálu). Také vliv kuličkového šroubu (s tolerancí 0,023 mm na 300 mm délky) lze případně eliminovat korekční tabulkou.

6.10 Volba řídicího systému

Pro modelářské frézky je z důvodu vysoké finanční náročnosti nemožné implementovat profesionální řídicí systémy typu Siemens Sinumerik, Heidenhain atd. I přesto jsou na řídicí systém kladeny vysoké požadavky, proto je nutné na jejich základě vhodný řídicí systém vybrat.

V dané kategorii lze uvažovat nad třemi již prověřenými způsoby řízení [63,64,65]:

- Mach3
- Linux CNC
- Gravos Armote

Mach3 je funkční vyzkoušené řešení u CNC modelářských frézek. Nicméně aby stroj mohl pracovat jako multifunkční (využívat funkce 3D tisku), bylo by nutné jej přeprogramovat, což bez detailního prozkoumání jeho struktury a značných programátorských zkušeností nemusí vést k vytvoření funkčního a spolehlivého řídicího systému [63,64].

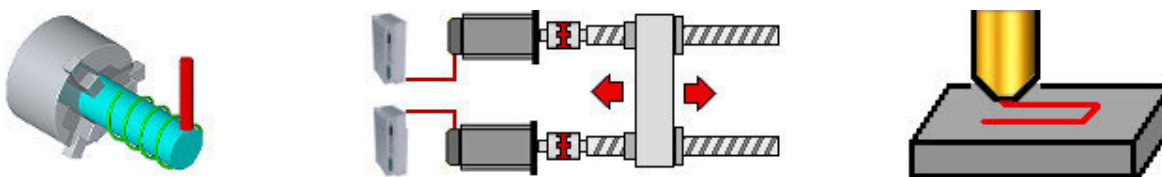
Další variantou je systém Linux CNC. Tento software je pro soukromé užití zcela zdarma a umožňuje veškeré přestavby a možnosti naprogramování nových funkcí. Některé amatérské tiskárny jsou již řízeny systémem Linux CNC, a proto lze předpokládat, že by bylo reálné vytvořit jeden řídicí systém pro obě technologické operace [63,64].

Nicméně pro danou frézku bylo rozhodnuto pro řešení od společnosti Gravos CNC s.r.o. Jedná se o českého výrobce řídicích systémů pro CNC stroje, včetně možnosti dodání veškerého příslušenství (pohony, elektronika, napájecí zdroje atd.). Tím pádem je v případě poruchy, servisu nebo zprovoznování možná rychlá komunikace, což pro většinu potenciálních tuzemských zákazníků je velká výhoda [63,64,65].

Konkrétní řídicí systém byl vybrán Armote v1.999. Je to systém, který již umožňuje řízení CNC frézování, řezání laserem nebo plazmou. Tento systém je neustále upravován a na základě komunikace se společností Gravos je nyní se zdárnými výsledky odlaďován pro technologii 3D tisku (se společnou HW interpolační jednotkou) [65,66].

Konkrétní typ HW interpolátoru by byl vybrán na základě množství funkcí (i příslušenství) a především jejich požadavcích na počet vstupů a výstupů. Řízení a ovládání probíhá na bezpečném stejnosměrném napětí 24 VDC [65].

Systémy umožňují souvislé ovládání až 4 os. Jelikož je osa X poháněna dvěma pohony a zároveň při tisku je krokový motor extruderu čtvrtou osou, je nutné oba pohony v ose X řídit společným výstupem (řízení dvěma výstupy zobrazeno na Obr. 57). Aby bylo možné nezávisle referovat pravou a levou osu zvlášť, lze pro referování jedné osy vypnout budič druhého pohonu. Tím bude při každém referování docílena pravoúhlost osy X a Y. Přesnost referování bude dána indukčními snímači, které mají vysokou přesnost, rozlišení i opakovatelnost. Toto řešení má nevýhodu v proudovém omezení na výstupu (jeden výstup pro dva pohony), nicméně pro navrhovaný stroj není toto omezení limitující [65,66].



Obr. 57) Možnosti využití čtvrté osy u systému Gravos (vpravo např. 3D tisk) [65]

6.11 Doporučené příslušenství stroje

V této kapitole jsou vypsány možnosti přidavného příslušenství, které zvyšují funkcionalitu stroje a efektivnost práce.

Otočný stůl

V případě frézování lze možnost řízení čtvrté osy využít pro řízení otočného stolu. Jejich nabídka je velice široká a konkrétní typ by bylo vhodné vybrat konkrétně pro typické díly, které na stroji budou nejčastěji obráběny.

CNC otočný stůl od společnosti SEHO (Obr. 58) konkrétně typ o značení SR-160, přidává navrhovanému CNC stroji možnost obrábění rotačních dílců. Tímto způsobem lze částečně nahradit technologii soustružení.

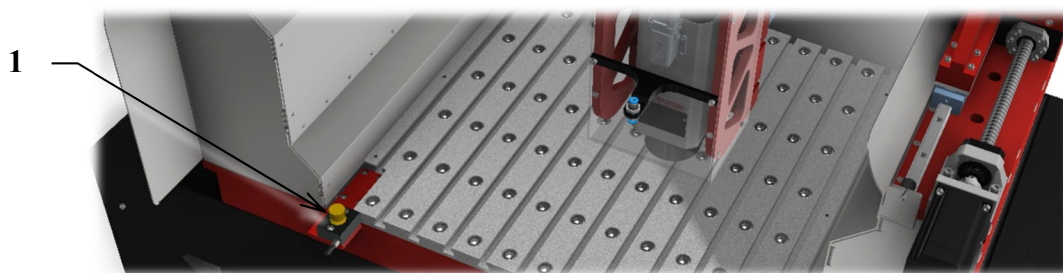


Obr. 58) CNC otočný stůl SEHO SR-160 [67]

Pevný senzor osy Z

Tento senzor bude použit pro měření délky nástroje a automatické zanesení tohoto údaje do nástrojové knihovny. Senzor osy Z může sloužit taktéž pro referování 3D tiskové hlavy, nebo lze využít indukční snímač, který je již její součástí.

Byl vybrán senzor s označením GTS5 (1), který je umístěn v přední části zařízení (Obr. 59).

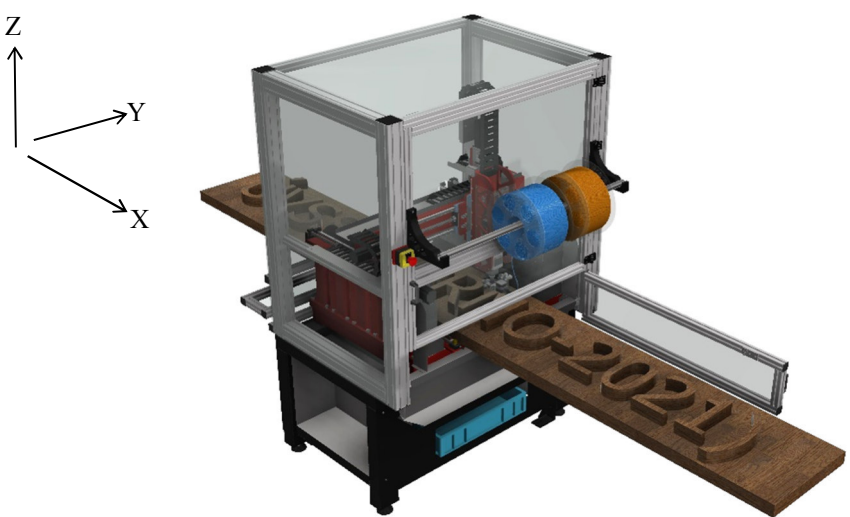


Obr. 59) Umístění pevného senzoru osy Z na stroji

Další možností je použít ruční ovladač MPG, který umožní polohování nástroje v jednotlivých osách pomocí potenciometru a přepínače os. Pokud by řídicí systém stroje neumožňoval ovládat všechny periferie stroje (včetně bezpečnosti), lze uvažovat nad použitím nadřazeného programovatelného PLC řídicího systému.

7 SHRUTÍ PARAMETRŮ NOVÉHO STROJE

Tab 35) Shrnutí parametrů nově konstruovaného stroje

PARAMETRY NOVĚ KONSTRUOVANÉHO STROJE				
				
Zaměření	Parametr (popis)		Hodnota	Jednotky
Frézování	Obráběný materiál		Dřevo, plast,	[–]
	Maximální velikost obrobku	Osa X	500	[mm]
		Osa Y	500	[mm]
		Osa Z	200	[mm]
	Maximální průměr nástroje		10	[mm]
	Výkon vřetena		2200	[W]
	Otáčky vřetena		6000-30000	[min ⁻¹]
3D tisk	Tiskový materiál s teplotou tavení do		300	[°C]
	Velikost tiskové plochy	Osa X	500	[mm]
		Osa Y	500	[mm]
		Osa Z	180	[mm]
	Teplota vyhřívané podložky		110	[°C]
Společné vlastnosti	Rychloposuv	Osa X	12	[m · min ⁻¹]
		Osa Y	12	[m · min ⁻¹]
		Osa Z	10	[m · min ⁻¹]
	Napájecí napětí		230	[V]
	Jištění		25	[A]
	Maximální šířka stroje (stěhování)		800	[mm]
	Přesnost polohování (elektronické rozlišení závislé na reálném nastavení)		max 0,01	[mm]
	Hmotnost stroje		750	[kg]
	Půdorys stroje [Š × H]		1350 x 1235	[mm]
	Výška stroje		2050	[mm]

7.1 Zhodnocení, diskuze a doporučení pro praxi

Konstrukce strojů a zařízení se skládá z několika technických oblastí, kterou v praxi zajišťují konstrukční týmy tvořené jednotlivými odborníky. Jelikož se i v této práci prolíná mnoho technických profesí, nebylo z důvodu obsáhlosti této práce možné vše náležitě analyzovat, vyřešit a popsat. Proto bude tato kapitola ve stručnosti věnována autorovým myšlenkám, nápadům a poznatkům, které mohou být pro praktickou realizaci podstatné nebo na ně lze v budoucnu navázat.

Konstrukce stojanů i příčnicku je řešena pro danou velikost a účely jako relativně masivní prvek. Hmotnost pohybujících se částí byla kompenzována použitím leteckého duralu, který v rámci stroje nečiní větší finanční náklady. Pokud by měla být konstrukce určena pouze pro frézování (bez přidané multifunkce v podobě 3D tisku), bylo by vhodné zvážit svařovanou konstrukci příčnicku z oceli. Za cenu vyšší hmotnosti by nebyla výroba samotných dílů tolik nákladná jako v případě montované konstrukce z duralu.

Mazání kuličkových šroubů a lineárního vedení bude v případě tohoto stroje řešeno ručním mazáním v předepsaných intervalech (dáno výrobcí těchto komponent). Pro větší nasazení stroje by bylo vhodné doplnit stroj centrálním mazáním (v konstrukci je na připojení hadiček k mazacím bodům myšleno).

Další možnou modifikací je změna trojfázových krokových motorů za servomotory. Ačkoli z hlediska výpočtů a grafů se zdá být servopohon jako finančně nevýhodná alternativa, v praxi by to přineslo lepší dynamické vlastnosti stroje s výraznější rezervou oproti navrhovaným krokovým motorům. V práci bylo počítáno se zrychlením v osách X a Y o velikosti $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Tato hodnota při tisku ostrých hran znamená brždění z rychlosti o velikosti $12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na dráze o délce 10 mm. Proto pro tisk maximální rychlostí jsou nejvhodnější rádiusy objektů o poloměru větším než 10 mm. Jedná se pouze o konstatování problému, který se projevuje i u ultralehkých tiskáren.

Také doplnění os o absolutní odměřování ve formě optického pravítka by stroj výrazně pozvedlo, protože i v případě krokových motorů s uzavřenou smyčkou je nutné systém odladit tak, aby ke ztrátě kroků nedocházelo. Také by se odstranil vliv nepřesnosti kuličkových šroubů.

V případě frézování deskových materiálů o vyšší měrné řezné síle lze doporučit použití upínací kostky, která by zmírnila dopad vyložení včetně majícího negativní vliv na tuhost stroje (rychlost posuvů, kvalita povrchu, životnost nástroje atd.). To samé platí i pro frézování menších předmětů, které by bylo vhodnější upnout do svěráku, který tento negativní efekt vyložení včetně taktéž eliminuje. Svěrák je vhodné upínat blíže k přední části zařízení, protože je zde prostor pro manipulaci s kličkou v mezeře určené pro odvod třísek.

Stroj by dále bylo možné vylepšit o automatickou výměnu tiskové hlavy, která by mohla spočívat pouze ve vytvoření zásobníku s dostatečným krytím proti nečistotám z obrábění.

Na závěr je vhodné zamyslet se nad situací potenciálního zákazníka či amatérského modeláře. Totiž jedna z dalších možností, jak vlastnit CNC frézku, je retrofitting starých obráběcích strojů (nahrazení pohonů servopohony, doplnění řídicího systému, odměřování atd.). Úskalí lze spatřit v dříve hojně využívaných kluzných vedeních, trapézových závitech atd., kde úspěšnost i výhodnost přestavby je závislá na mnoha faktorech. Další možností je přidání frézovací hlavy ke standardní 3D tiskárně, což nelze z hlediska tuhosti doporučit.

Navrhovaná konstrukce nového stroje se zdá být vhodnou alternativou a využití lze předpokládat i v průmyslu, např. při prototypování v rámci konstrukčních kanceláří.

8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem malé multifunkční modelářské CNC frézky umožňující frézování slitin hliníku i 3D tisk metodou FDM.

Na základě studie již dostupných strojů na trhu a autorových požadavků byly stanoveny vstupní požadavky kladené na nový stroj. Na základě těchto požadavků a multikriteriální analýzy byla provedena volba kinematického uspořádání stroje, kde byla jako nejlepší varianta shledána koncepce horní gantry.

Konstrukční návrh stroje se skládá z výpočtové a konstrukční částí. Nejdříve byl proveden návrh vřetena dle předpokládaných řezných podmínek při frézování a vrtání. Následně byl proveden rozbor možných řešení lineárních posuvových soustav s následnou volbou již konkrétního řešení pro navrhovaný stroj (pohony, lineární vedení, pohybové mechanismy atd.). V úzkém spojení s konstrukčním návrhem stroje bylo v rámci celého stroje provedeno dimenzování lineárního vedení a kuličkových šroubů. Na základě výsledků z předchozích výpočtů byla provedena výsledná volba pohonů a lineárního vedení pro osy X, Y a Z.

Dle předchozích výsledků analýzy řešené problematiky i výpočtové zprávy bylo představeno konstrukční řešení celého stroje. Na základě multikriteriální analýzy bylo rozhodnuto pro kombinovaný rám stroje spočívající v použití litinové průměrné desky a svařovaných stojanů. Následně byla z konstrukčního i technologického hlediska popsána konstrukce spodního rámu stroje, pravého i levého stojanu, příčnicku, saní a smýkadla. Pro možnost 3D tisku byla představena podoba pracovního stolu, tiskové podložky a tiskové hlavy, kterou bylo nutné konstrukčně přepracovat z již na trhu dostupné tiskové hlavy.

V následující části bylo popsáno řešení zásobníku nástrojů sloužící pro automatickou výměnu nástrojů. Z hlediska bezpečnosti, přívodu energií, třískového hospodářství aj. bylo představeno řešení krytování stroje.

Jako doporučení pro případnou praktickou realizaci byly popsány možnosti seřízení geometrie stroje a zvýšení jeho přesnosti. Na základě daných parametrů byla provedena volba řídicího systému a doporučeného příslušenství stroje.

Na základě všech předchozích kapitol a znalostí je výsledkem práce 3D model navrhovaného stroje, který je zpracován v aplikaci Autodesk Inventor Professional 2021. Po splnění všech dílčích částí zadání byla vytvořena výkresová dokumentace vybraných konstrukčních uzlů.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] POHOŘELSKÝ, Zbyněk. FDM technologie (Fused Deposition Modeling). *3Dinventorblog: Blog o používání programu Autodesk Inventor* [online]. 2012, 17. 10. 2016 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>
- [2] PRŮŠA, Josef. Jak funguje Multi Material Upgrade 2.0? *PRUSAPRINTERS BLOG: Multi Material Upgrade 2.0 is here!* [online]. 30. 8. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=E1ZxTCaPLrs>
- [3] MAXIMIZE UPTIME AND PRODUCTIVITY. *ZMORPH 3D PRINTERS THAT DELIVER* [online]. 2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://zmorph3d.com/>
- [4] 3D tiskárna ZMorph VX Full Set. *Elegant 3d* [online]. 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.elegant3d.cz/3D-tiskarna-ZMorph-VX-Full-Set-d398.htm?gclid=Cj0KCQjw4cOEBhDMARIsAA3XDRjRfsPgYr4b-j8-SiccEenPj48d3KEeQyuFf5mC2F7dJJ7s3zsRWbYaAtmlEALw_wcB
- [5] Diabase H5 CNC LITE H5-400A. *3D Herndon* [online]. 2016 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://3dherndon.com/diabase-cnc-lite-h5-400a.html?category_id=63
- [6] 5axismaker 5xm600XL. *5axismaker* [online]. 2014 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://www.5axismaker.com/product/5axismaker-5xm600xl/#>
- [7] Lucas Carolo. 5-Axis 3D Printer: The Latest Advancements. *ALL3DP* [online]. 28. 2. 2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/5-axis-3d-printer-the-latest-advancements/>
- [8] *Znalosti a zkušenosti: Obráběné materiály. SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx?newsarchivetagfilter=Aluminium>
- [9] CoroMill Plura: 2P122-1000-NC H10F. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=2P122-1000-NC%20%20%20%20%20%20%20%20H10F>
- [10] Nástroje. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/toolguide.aspx>
- [11] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0
- [12] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1

- [13] CoroDrill 860: 860.1-0600-016A0-GM X1BM. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=860.1-0600-016A0-GM%20X1BM>
- [14] Spindles and accessories: Automatic tool changer and accessories. *SOROTEC* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.sorotec.de/shop/Spindles/hf-spindle-aut-tool-change/>
- [15] TEKNOMOTOR: ATC41 MOTOR ISO20. *Damen CNC: building blocks in motion control* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.damencnc.com/en/automatic-toolchanger-atc41-c-2db-iso20-sn-s6-2-2kw-base24krpm-max30krpm/a4008>
- [16] Krokové motory: Ezi-SERVO Plus-R. *RAVEO: world of motion* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/krokovye-motory-zpetna-vazba-fastech>
- [17] Přesné polohovací systémy a elektrické regulační pohony. *BERGER POSITEC: motion technology* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.regulacni-pohony.cz/>
- [18] HÁJEK, L. Řízení CNC frézky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Arm.
- [19] SINGULE, Vladislav. Pohony a akční členy: Vlastnosti a použití mikromotorů. *Automa* [online]. 2008(3), 3 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/36910.pdf
- [20] Mechanika a komponenty. *Strojirenstvi: CNC Fórum* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewforum.php?f=72>
- [21] FF 3D printing calibration: 3D printer belt tension and backlash. *WIKIMEDIA COMMONS* [online]. 2020, 2. 7. 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_printing_calibration_%E2%80%93_3D_printer_belt_tension_and_backlash.svg
- [22] Řemen osy Y pro 3D tiskárny Creality Ender 3/Pro. *LEVNA3DTISKARNA* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.levna3dtiskarna.cz/remeny-y-pro-3d-tiskarny-creality-ender/>
- [23] Apex Dynamics. High-Torque převodovky pro přesné aplikace: Výzkum, vývoj a inovace, Výroba a technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 9. 5. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/high-torque-prevodovky-pro-presne-aplikace>
- [24] Převodovky APEX DYNAMICS. *Apexdyna: AUTOCONT CONTROL SYSTEMS spol. s r. o.* [online]. 2017 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://www.apexdyna.cz/O-Apex-Dynamics>
- [25] Pastorky a ozubené hřebeny. *APEXDYNACZECH: APEX DYNAMICS CZECH s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/pastorky-a-ozubene-hrebeny/>

- [26] Rozšíření našeho sortimentu – lineární systém pro CNC pálicí stroje od jednoho dodavatele. *APEXDYNACZECH: APEX DYNAMICS CZECH s.r.o* [online]. 30.1.2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/rozsireni-naseho-sortimentu-linearni-system-laserove-palici-stroje-od-apex-dynamics/>
- [27] Rack & Pinion Drive Systems: Ultra-High Precision Rack & Pinion Drive Systems. *ATLANTA Drive Systems* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.atlantadrives.com/systems1.htm>
- [28] TEA technik s.r.o. Technické zajímavosti: Co jsou a jak fungují kuličkové šrouby. *Technicke-zajimavosti* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://technicke-zajimavosti.blogspot.com/2014/08/co-jsou-jak-funguji-kulickove-srouby.html>
- [29] Lineární technika: Kuličkové a trapézové šrouby. *BIBUS s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.bibus.cz/produkty/tlumici-a-linearni-technika/linearni-technika/kulickove-a-trapezove-srouby/>
- [30] Výroba a technologie, Komponenty: Technické aspekty aplikace kuličkových šroubů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 11. 04. 2001, **2001**(4) [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technicke-aspekty-aplikace-kulickovych-sroubu>
- [31] LUDVA, J. *Konstrukční návrh portálové CNC frézky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D..
- [32] MAREK, Jiří. Výzkum, vývoj a inovace, Komponenty, Výroba a technologie: Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 5. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 24. 6. 2015, **2015**(7,8) [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-5>
- [33] Produkty: Kuličkové šrouby. *HIWIN* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby>
- [34] Válcované šrouby: Jednoduchá matice přírubová FSC/FSI dle DIN 69051. *HIWIN* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/valcovane-srouby/53_jednoducha-matice-prirubova-fsc-fsi-dle-din-69051
- [35] Preload and Rigidity: Nut Designs. *Steinmeyer* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.steinmeyer.com/en/technology/preload-and-rigidity/nut-designs/>
- [36] Lineárna technika: GULÔČKOVÉ SKRUTKY A MATICE. *Powerbelt* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://powerbelt.sk/golyosorsokbr-golyosanyak-c457>
- [37] Kuličkové šrouby. *CNCshop.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/kulickove-srouby_c
- [38] Printer Supplies: Sada 1 set 3D tiskáren Openbuilds Sada portálů V Sada speciálních kluzných desek pro hliníkové profily s drážkou do 2020/2040 V. *Wish* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.wish.com/product/5ec647b4f4e3642c46779bc0?hide_login_modal=true

e&from_ad=goog_shopping&_display_country_code=CZ&_force_currency_code=CZK&pid=googleadwords_int&c=%7BcampaignId%7D&ad_cid=5ec647b4f4e3642c46779bc0&ad_cc=CZ&ad_lang=CS&ad_curr=CZK&ad_price=184.00&campaign_id=9038860043&exclude_install=true&gclid=Cj0KCQjw38-DBhDpARIsADJ3kjnMWJxNHaw_L4kycxfYKzUVESvML1DMysKEDohYd-db6bXzTHho8zQaAtOmEALw_wcB&share=web

- [39] Gliding Surface Technology: MR Mini-Rail Miniature Linear Guide. *PBC Linear* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.pbclinear.com/Products/Gliding-Surface-Technology/MR-Mini-Rail-Miniature-Linear-Guide>
- [40] Linear Ball Bearings: CNBTR Horizontal 8mm Dia Linear Motion Ball Bearing Slide Bushing & 200mm Linear Shaft Optical Axis with Rod Rail Support Set. *Amazon* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/CNBTR-Horizontal-Bearing-Bushing-Optical/dp/B01KL7I65W>
- [41] BUDIMIR, MILES. LINEAR BEARING: One-piece ETX linear bearing/pillow blocks suitable for use in radioactive environments. *Linear Motion Tips* [online]. 12. 2. 2019, 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/one-piece-etx-linear-bearing-pillow-blocks-suitable-for-use-in-radioactive-environments/>
- [42] Kuličkové vedení: Vozík HGH. *HIWIN* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-hg-qh/17_vozik-hgh
- [43] Lineárna technika: VODIACE TYČE S KRUHOVÝM PRIEREZOM A LINEÁRNE LOŽISKÁ. *Powerbelt* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://powerbelt.sk/kortengelyekbr-linearis-csapagyak-c460>
- [44] Ball Screw Shafts. *Tuli-shop* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.tuli-shop.com/ball-screw-shaft>
- [45] Gulôčkové skrutky a matice TBI MOTION pre priemyselné účely: TYP OFU PRE VŠEOBECNÉ POUŽITIE, ZOSILNENÝ. *Powerbelt* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://powerbelt.sk/ofu-tipusbr-altalanos-feladatrabr-erositett-p2475>
- [46] Lineárne vedenia a vozíky: TBI MOTION LINEÁRNY POSUV PRE PRIEMYSEL, (GULÔČKOVÉ PREVEDENIE). *Powerbelt* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://powerbelt.sk/tbi-motion-megvezetesbr-ipari-felhasznalarabrgolyos-kivitel-c540>
- [47] Kuličkové šrouby: ES-M32320 Easy Servo Motor 2Nm. *CNCshop.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/es-m32320-easy-servo-motor-2nm>
- [48] Servopohony servo prevodovky: LIQI SERVOPOHON CENOVÝ VÝHODNÝ. *Powerbelt* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://powerbelt.sk/liqi-szervomotorbr-koltseghatekony-p978>

- [49] Leadshine Closed Loop Steppermotors: LEADSHINE CS-M22323B WITH BRAKE CLOSED LOOP STEPPER MOTOR. *Cncmotor* [online]. 2015 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://cncmotor.eu/electronic/motors-drivers/closed-loop-stepper-motors/leadshine-closed-loop/leadshine-closed-loop-steppermotors/leadshine-cs-m22323b-with-brake-closed-loop-stepper-motor>
- [50] Příměrné desky litinové DIN 876. *KMITEX s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://eshop.kmitex.cz/litinove-desky/59-primerne-desky-litinove-din-876-8595192306723.html>
- [51] PROCHÁZKOVÁ, Irena, pobočka Praha (kalibrace). Prosba ke studijním účelům [elektronická pošta]. Message to: jiristrnadik@gmail.com. 13. 3. 2021 14:54 [cit. 2021-05-18].
- [52] Ploché recyklované materiály: TLUMICÍ ELASTICKÉ DESKY ELASTON-ELTEC FS 700. *Gumex* [online]. 1995 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/h/tlumici-elasticke-desky-elaston-eltec-fs-700-00554>
- [53] Milan Meruňka, Vývoj speciálních vysokopevnostních betonů s nízkými objemovými změnami. Brno, 2018. 84 s. Bakalářské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [54] Hřídelové spojky: SPIRÁLOVÉ SPOJKY TYP WKAK. *T.E.A. TECHNIK* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/typ-wkak/>
- [55] Profile system: The MiniTec profile system: One for all! *MiniTec GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.minitec.de/en/products/profile-system>
- [56] Svěráky stoly upínky: TD upínací stůl s T drážkami. *CNCshop.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/upinaci-stul-s-t-drazkami>
- [57] Aluminum Heated Bed w/ 3mm Coated Glass Plate (24v) - 500mm x 500mm. *ZYLTECH ENGINEERING* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.zyltech.com/zyltech-3mm-500x500-24v-heated-bed-kit-w-coated-glass/>
- [58] Bondtech Mini Geared (BMG) Extruder for groove mount E3D Hotends. *Bondtech AB.* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.bondtech.se/product/bmg-extruder/>
- [59] MP23Racing. CR-10 | CR-10S | BondTech BMG + E3D V6 + EZABL Mount Assembly. *GrabCAD, a STRATASYS solution* [online]. 2021, 23. 2. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/cr-10-cr-10s-bondtech-bmg-e3d-v6-ezabl-mount-assembly-1>
- [60] Accessories toolchanger: SK20 Tool tray spring loaded. *Sorotec GmbH* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.sorotec.de/shop/SK20-Tool-tray-spring-loaded.html>
- [61] KRYTOVÁNÍ STROJŮ, TRÍSK.HOSPODÁŘSTVÍ, MANŽETY: NBR/CSM KRUHOVÉ KRYCÍ MĚCHY. *HENNLICH* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18].

Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/krytovani-stroju-a-triskove-hospodarstvi-manzety-nbrcsm-kruhove-kryci-mechy-1907.html>

- [62] ENERGET. ŘETĚZY, FLEXIBILNÍ KABELY: ENERGETICKÉ ŘETĚZY. *HENNLICH* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/energeticke-retezy-flexibilni-kabely-energeticke-retezy-51.html>
- [63] ZZ912. *Linux CNC z pohledu začátečníka: Nejznámější řídicí systémy dostupné pro hobiky* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://zz912.webnode.cz/proc-lcnc/>
- [64] What is the best CNC control software? *MEKANIKA* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://mekanika1.odoo.com/blog/learn-1/what-is-the-best-cnc-control-software-14>
- [65] CNC řídicí systémy: Výkonné řídicí systémy pro CNC stroje. *Gravos CNC* [online]. 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://gravos.cz/index.htm>
- [66] VOSTAREK, M., Gravos CNC s.r.o. Konzultace [elektronická pošta]. Message to: jiristrnadik@gmail.com. 19. 3. 2021 13:41 [cit. 2021-05-18].
- [67] SR-160: CNC OTOČNÝ STŮL. *SEHO INDUSTRY CO., LTD.* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://www.sehoworld.com/cs/product/CNC-Rotary-Table_160.html
- [68] CNC CONTROLLERS>: VFD022E21A 1x230V->3x230V 2.2KW. *DamenCNC B.V.* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.damencnc.com/en/vfd022e21a-1x230v-3x230v-2-2kw/a2222>
- [69] ATC41 MOTOR ISO20: DIY Pneumatic Package for TeknoMotor ATC41. *DamenCNC B.V.* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.damencnc.com/en/diy-pneumatic-package-for-teknomotor-atc41/a3896?c=408>
- [70] MALÁSEK, P. Náhon posuvové souřadnice portálového obráběcího centra pomocí pastorku a hřebene. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 96s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Marek, Dr..
- [71] MIHALY, Gabrie., POWER BELT pohonné mechanizmy. Technický dotaz na lineární techniku [elektronická pošta a telefonický hovor]. Message to: jiristrnadik@gmail.com. 15-16. 3. 2021 [cit. 2021-05-18].
- [72] Tlmiace a stieracie zostavy: TYP SZ ZVÝŠENÁ OCHRANA PROTI KOVOVÝM A DREVENÝM HOBLINÁM. *Powerbelt* [online]. 2018 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.powerbelt.sk/sz-tipusbr-megnovelt-porvedelem-fem-es-faforgacshoz-p2128>
- [73] CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2015 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotka
a	Lineární zrychlení (zpomalení) příčniku	$[m \cdot s^{-2}]$
α	Úhel naklonění pohybové soustavy	$[^\circ]$
A_D	Jmenovitý průřez třísky při vrtání do plného materiálu	$[mm^2]$
A_{Efr}	Radiální hloubka řezu frézy	$[mm]$
A_{Pfr}	Axiální hloubka řezu frézy	$[mm]$
b_D	Šířka třísky	$[mm]$
C_0	Statická únosnost vozíku	$[N]$
C	Dynamická únosnost vozíku	$[N]$
d	Jmenovitý průměr šroubu	$[mm]$
D_{fr}	Průměr frézy (řezný)	$[mm]$
d_k	Malý průměr šroubu	$[mm]$
D_{nmax}	Maximální otáčkový faktor	$[-]$
D_n	Otáčkový faktor pro nejvyšší velikost rychloposuvu	$[-]$
D_{vr}	Průměr vrtáku (řezný)	$[mm]$
f_1	Součinitel tření ve vodících plochách	$[-]$
f_2	Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	$[-]$
F_{cf}	Řezná síla při frézování	$[N]$
F_{cv}	Řezná síla při vrtání	$[N]$
F_{GT}	Tíhová síla působící v těžišti pohybujících se hmot	$[N]$
f_H	Faktor tvrdosti	$[-]$
F_{kdx}	Axiální síla působící při statickém zatěžování na šroub	$[N]$
F_{ksx}	Statická axiální síla působící na šroub	$[N]$
F_{ksz}	Statická axiální síla působící na kuličkový šroub v ose Z	$[N]$
F_{kx}	Maximální teoretická dovolená axiální síla	$[N]$
F_{kxmax}	Maximální dovolená provozní axiální síla	$[N]$
F_m	Střední hodnota napětí	$[N]$
F_P	Síla od předeptnutí kuličkového šroubu	$[N]$
F_{pv}	Síla posuvu při vrtání	$[N]$
F_{RH34}	Radiální síla působící na horní lineární vedení	$[N]$
F_{RLV}	Radiální síla působící na levé vedení	$[N]$
F_{RPA}	Radiální síla působící na přední vozík (s označením A)	$[N]$

F_{RPB}	Radiální síla působící na zadní vozík (s označením B)	[N]
F_{RPV}	Radiální síla působící na pravé vedení	[N]
F_{RPV}	Radiální síla (působící na pravé vedení)	[N]
F_{RS12}	Radiální síla působící na spodní lineární vedení	[N]
f	Statický bezpečnostní faktor	[-]
$F(x)$	Síly v ose X	[N]
$F(y)$	Síly v ose Y	[N]
$F(z)$	Síly v ose Z	[N]
f_T	Faktor teploty	[-]
F_{TH3}	Tečná síla působící na vozík 3	[N]
F_{TH4}	Tečná síla působící na vozík 4	[N]
F_{TLV}	Tečná síla působící na pravé a levé vedení	[N]
F_{TPA}	Tečná síla působící na přední vozík (s označením A)	[N]
F_{TPB}	Tečná síla působící na zadní vozík (s označením B)	[N]
F_{TPV}	Tečná síla (působící na pravé vedení)	[N]
F_{TS1}	Tečná síla působící na vozík 1	[N]
F_{TS2}	Tečná síla působící na vozík 2	[N]
f_W	Faktor zatížení	[-]
f_{Zfr}	Posuv na zub (pro frézu)	[mm]
f_{zv}	Posuv na břit při vrtání	[mm]
f_{Zvr}	Posuv na otáčku (pro vrták)	[mm]
g	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
k_{c1}	Měrná řezná síla	$[N/mm^2]$
h_D	Tloušťka třísky	[mm]
h_m	Střední tloušťka třísky při frézování	[mm]
$J_{Kš}$	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu	$[kg \cdot m^2]$
J_M	Moment setrvačnosti posuvových hmot (redukovaný do osy šroubu)	$[kg \cdot m^2]$
J_{Mot}	Moment setrvačnosti motoru	$[kg \cdot m^2]$
J_{rhM}	Celkový moment setrvačnosti (redukovaný na hřídel motoru)	$[kg \cdot m^2]$
J_{sp}	Moment setrvačnosti hřídelové spojky	$[kg \cdot m^2]$
k_{cf}	Specifická řezná síla (frézování)	$[N/mm^2]$
k_{cv}	Specifická řezná síla (vrtání)	$[N/mm^2]$
k_d	Koeficient uložení kuličkového šroubu	[-]
k_k	Koeficient závislý na typu zatížení (předepsáno výrobcem v katalogu)	[-]
l_1	Délkový rozměr	[mm]
l_{10}	Délkový rozměr	[mm]
l_{11}	Délkový rozměr	[mm]

l_{12}	Délkový rozměr	[mm]
l_{13}	Délkový rozměr	[mm]
l_{14}	Délkový rozměr	[mm]
l_2	Délkový rozměr	[mm]
l_3	Délkový rozměr	[mm]
l_4	Délkový rozměr	[mm]
l_5	Délkový rozměr	[mm]
l_6	Délkový rozměr	[mm]
l_7	Délkový rozměr	[mm]
l_8	Délkový rozměr	[mm]
l_9	Délkový rozměr	[mm]
l_{dx}	Vzdálenost mezi ložisky, vycházející z 3D modelu finálního konstrukčního návrhu	[mm]
L_h	Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách	[h]
l_{kx}	Nepodepřená délka kuličkového šroubu (vychází z konstrukčního návrhu)	[mm]
L_{ot}	Životnost kuličkového šroubu v otáčkách	[ot]
L_v	Trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v délkové jednotce	[m]
L_{vh}	Trvanlivost nejvíce zatíženého vozíku v časové jednotce	[h]
$M_A(x)$	Moment kolem osy X vztažený k bodu A	[N · m]
$M_A(y)$	Moment kolem osy Y vztažený k bodu A	[N · m]
$M_A(z)$	Moment kolem osy Z vztažený k bodu A	[N · m]
$M_B(x)$	Moment kolem osy X vztažený k bodu B	[N · m]
m_c	Konstanta měrné řezné síly	[-]
m_{cx}	Součet hmotností všech pohybujících se částí (včetně vřetena, nástroje, kabeláže, spojovacího materiálu atd.), jejichž změny z hlediska dynamiky (zrychlení a zpomalení) jsou pohlcovány na vzpěr kontrolovaným kuličkovým šroubem	[kg]
m_{cy}	Hmotnost těles působících na vedení osy Y	[kg]
m_{cz}	Hmotnost pohybující se částí konstrukce v ose Z	[kg]
M_{GT}	Ztrátový moment od třecích sil	[N · m]
M_{Kf}	Krouticí moment (frézování)	[N · m]
M_{KSM}	Ztrátový moment kuličkového šroubu	[N · m]
M_{Kv}	Krouticí moment (vrtání)	[N · m]
M_{MDx}	Potřebná velikost momentu motoru z hlediska dynamiky	[N · m]
M_{MDz}	Potřebná velikost momentu motoru z hlediska dynamiky	[N · m]
M_{Mx}	Potřebný moment motoru z hlediska statiky	[N · m]
M_{Mz}	Potřebný moment motoru z hlediska statiky	[N · m]
M_{zdrhm}	Celkový moment zátěže (redukovaný na hřídel motoru)	[N · m]

n_f	Otáčky vřetena při frézování	[1/min]
n_{kx}	Kritické otáčky	[1/min]
n_m	Střední hodnota otáček	[1/min]
n_{maxx}	Maximální pracovní otáčky	[1/min]
n_{rx}	Otáčky při rychloposuvu	[1/min]
n_v	Otáčky vřetena při vrtání	[1/min]
P	Velikosti stoupání závitu	[mm]
P_f	Požadovaný výkon vřetena při frézování	[W]
P_v	Požadovaný výkon vřetena při vrtání	[W]
P_x	Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose X	[N]
P_y	Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose Y	[N]
P_z	Statické ekvivalentní zatížení nejvíce namáhaného vozíku v ose Z	[N]
t_{px}	Doba, během které dojde ke zrychlení z klidu na hodnotu v_{rx} nebo k brždění do klidového stavu z hodnoty v_{rx}	[s]
v_{Cfr}	Řezná rychlost (pro frézu)	[m · min ⁻¹]
v_{Cvr}	Řezná rychlost (pro vrták)	[m · min ⁻¹]
v_f	Rychlost posuvu při frézování	[mm/min]
v_{fv}	Rychlost posuvu při vrtání	[mm/min]
v_{rx}	Maximální hodnota rychlosti posuvu stanovená vstupními požadavky	[m · min ⁻¹]
z_{fr}	Počet břitů frézy	[-]
z_{vr}	Počet břitů vrtáku	[-]
γ_{fr}	Nástrojový úhel čela frézy	[°]
γ_{vr}	Nástrojový úhel čela vrtáku	[°]
ε_s	Úhlového zrychlení kuličkového šroubu	[rad · s ⁻²]
η_c	Celková účinnost	[-]
$\eta_{Kš}$	Účinnost kuličkového šroubu a matice	[-]
η_L	Účinnost uložení kuličkového šroubu	[-]
η_v	Účinnost valivého vedení	[-]
κ_{fr}	Nástrojový úhel hlavního ostří frézy	[°]
κ_{vr}	Nástrojový úhel hlavního ostří vrtáku	[°]
λ_{fr}	Úhel šroubovice frézy	[°]

10.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Nanášení vrstev nataveného materiálu (pohled na strukturu) [1]	19
Obr. 2)	Multifunkční ZMorph VX (vlevo 3D tisk, vpravo frézování)	20
Obr. 3)	Stroj Diabase CNC LITE H5-400A s detailním vyobrazením pracovního stolu a zásobníku tiskového materiálu [5]	22
Obr. 4)	Stroj 5AXISMAKER ve variantě XL o pracovní ploše ve tvaru krychle o hraně 600 mm (střední velikost produktu) [6]	24
Obr. 5)	Vřeteno Teknomotor s označením ATC41-C-2DB-ISO20-SN-HY [14]	35
Obr. 6)	Pro přehlednost vizuálně upravené zobrazení výkonové momentové charakteristiky [14]	36
Obr. 7)	Frekvenční měnič Delta Electronics typu VFD022E21A [68]	37
Obr. 8)	„Pneumatický balíček“, od společnosti Damen CNC [69]	37
Obr. 9)	Zjednodušený pohled na morfologii posuvové soustavy (převzato z [12])	38
Obr. 10)	Možné varianty řešení náhonu (převzato z [12])	38
Obr. 11)	Mechanismus pro posun tiskové hlavy pomocí ozubeného řemene [21]	40
Obr. 12)	Detail ozubeného řemene [22]	40
Obr. 13)	Základní varianta pohonu pomocí pastorku a ozubeného hřebene nabízená společností Apex Dynamics Czech s.r.o. [25]	41
Obr. 14)	Řešení pohonu pomocí pastorku a ozubeného hřebene nabízené společností Apex Dynamics Czech s.r.o., kde je uplatněna technologie HeliTopo [26]	41
Obr. 15)	Použití děleného pastorku (výrobce Atlanta Drives Systems) [27]	41
Obr. 16)	Metoda Master-Slave nabízená v této konstrukční podobě společností Atlanta Drives Systems [27]	41
Obr. 17)	Varianty vedení obráběcích strojů (převzato z [12])	45
Obr. 18)	Vedení pomocí 4 kladek, kde spodní kladky lze (předepnout) pomocí excentrického šroubu [38]	45
Obr. 19)	Vedení nabízené společností PBC Linear s produktovým označením MR Mini-Rail [39]	45
Obr. 20)	Nepodepřené vodící tyče [40]	46
Obr. 21)	Podepřené lineární vedení [41]	46
Obr. 22)	Prizmatické vedení od společnosti HIWIN [42]	46
Obr. 23)	Schematicky vyobrazena pohybová soustava [12]	50
Obr. 24)	Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose X	52
Obr. 25)	Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose X	54
Obr. 26)	Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose Y	56

Obr. 27)	Schematický náčrt pro statický rozbor působících sil na vedení v ose Z	60
Obr. 28)	Pro přehlednost vizuálně upravené zobrazení průběhu kroutícího momentu v závislosti na otáčkách pohonu Leadshine ES-M32320 [47]	66
Obr. 29)	Pro přehlednost vizuálně upravené zobrazení průběhu kroutícího momentu v závislosti na otáčkách pohonu Panasonic MSMD012J1S [48]	66
Obr. 30)	Schematické vyobrazení montované konstrukce rámu stroje	67
Obr. 31)	Schematické vyobrazení svařované konstrukce rámu stroje	68
Obr. 32)	Schematické vyobrazení kombinované konstrukce rámu stroje	69
Obr. 33)	Protokol z měření průměrné desky 1042.3 od společnosti KMITEX [51]	70
Obr. 34)	Konstrukční návrh a popis jednotlivých periférií	71
Obr. 35)	Svařovaná konstrukce spodního rámu	72
Obr. 36)	Zobrazení svařence před obráběním	73
Obr. 37)	Stojan po frézování a broušení požadovaných ploch	74
Obr. 38)	Vzájemné svrtání stojanů s průměrnou deskou	75
Obr. 39)	Ukázka způsobu přitlačování kolejnice k referenční hraně za pomoci malých válcových kolíků	75
Obr. 40)	Již kompletně osazený levý stojan bez krytování os a bez osazeného zásobníku nástrojů	76
Obr. 41)	Vizualizace příčnicku (s neviditelnou přední deskou) pro zobrazení pozic vnitřních výztuh	77
Obr. 42)	Příčník ve stavu po obrobení všech funkčních ploch a již doplněný o trojúhelníkové výztuhy 1B a 1C	78
Obr. 43)	Již kompletně osazený příčník (horní žlab z eloxovaného hliníkového plechu slouží pro vedení a montáž energetického řetězu)	78
Obr. 44)	Řešení osy Z ve dvou pohledech pro vyobrazení celkového uspořádání (včetně saní)	79
Obr. 45)	Konstrukční řešení smýkadla	79
Obr. 46)	Pracovní stůl s „T“ drážkami	80
Obr. 47)	Vyhřívaná tisková podložka přimontována ke stolu s „T“ drážkami	81
Obr. 48)	Přepracovaná tisková hlava pro navrhovaný stroj	82
Obr. 49)	Držák tiskového materiálu	83
Obr. 50)	Držák nástrojů nabízený společností Sorotec s označením WZW.TDI.SK20WA	84
Obr. 51)	Konstrukční řešení zásobníku nástrojů	84
Obr. 52)	Konstrukční řešení hlavního bezpečnostního krytování	85
Obr. 53)	Kruhový krycí měch, zde od společnosti Hennlich [61]	86

Obr. 54)	Ochrana lineárního vedení nabízená společností HIWIN [42]	86
Obr. 55)	Funkční krytování stojanů pro snadnou údržbu a ochranu pohybového mechanismu zásobníku nástrojů	87
Obr. 56)	Krytování spodního stolu s řešením třískového hospodářství	88
Obr. 57)	Možnosti využití čtvrté osy u systému Gravos (vpravo např. 3D tisk) [65]	90
Obr. 58)	CNC otočný stůl SEHO SR-160 [67]	91
Obr. 59)	Umístění pevného senzoru osy Z na stroji	91

10.3 Seznam tabulek

Tab 1)	Parametry multifunkčního stroje ZMorph VX [4]	21
Tab 2)	Parametry multifunkčního stroje CNC LITE H5-400A [5]	23
Tab 3)	Parametry multifunkčního stroje 5AXISMAKER 5xm600XL [6]	25
Tab 4)	Volba parametrů navrhovaného multifunkčního stroje	27
Tab 5)	Varianty kinematického uspořádání stroje	28
Tab 6)	Konstrukční požadavky a omezení dle výrobní technologie	29
Tab 7)	Zhodnocení kritérií	29
Tab 8)	Rozdělení a vlastnosti slitin hliníku [8]	31
Tab 9)	Řezné podmínky pro frézování [8,9,10]	32
Tab 10)	Řezné podmínky pro vrtání [8,13]	33
Tab 11)	Shrnutí výsledků působení řezných sil	34
Tab 12)	Parametry zvoleného vřetena [14,15]	35
Tab 13)	Porovnání cen vřeten Teknomotor z nabídky společnosti Damen CNC [15]	37
Tab 14)	Popis charakteristických vlastností krokových motorů se zpětnou vazbou a střídavých servomotorů [12,19,20]	39
Tab 15)	Popis charakteristických vlastností trapézových a kuličkových šroubů [12, 28]	42
Tab 16)	Konstrukční varianty vymezení vŕle [32, 35]	43
Tab 17)	Cenová analýza kuličkových šroubů a matice [36]	44
Tab 18)	Vlastnosti vybraných komponent [42,45]	47
Tab 19)	Vstupní parametry pro dimenzování pohonu v ose X [12,42,45]	50
Tab 20)	Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení	53
Tab 21)	Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení	54
Tab 22)	Souhrnná tabulka zatížení předního a zadního vozíku pravého vedení	55
Tab 23)	Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení	57
Tab 24)	Souhrnná tabulka zatížení vozíků lineárního vedení osy Y	58
Tab 25)	Vstupní parametry pro dimenzování pohonu v ose Z	58
Tab 26)	Vstupní parametry pro dimenzování lineárního vedení	61
Tab 27)	Souhrnná tabulka zatížení vozíků lineárního vedení osy Z	62
Tab 28)	Souhrnná tabulka vypočtených statických ekvivalentních zatížení	63
Tab 29)	Parametry lineárního vedení a vozíku s označením TRH15VL [46]	63
Tab 30)	Výstupní parametry pro volbu pohonu v ose X (Y)	64
Tab 31)	Parametry relevantních pohonů [47,48]	65
Tab 32)	Výstupní parametry pro volbu pohonu v ose Z	65
Tab 33)	Zhodnocení kritérií	70
Tab 34)	Možnosti seřízení geometrie stroje (v jednotlivých osách)	89
Tab 35)	Shrnutí parametrů nově konstruovaného stroje	93

11 SEZNAM PŘÍLOH

Výkres sestavení	č. (PDF dokument):	2021-DP-00-000
Výkres svarku	č. (PDF dokument):	2021-DP-03-000-SVAR
Výkres součásti	č. (PDF dokument):	2021-DP-03-000-OBR
Výkres součásti	č. (PDF dokument):	2021-DP-04-002
3D model sestavy ve formátu (STEP):		2021-DP-00-000